

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Katedra telekomunikační techniky

Mach-Zehnderův interferometr jako  
modulátor pro optické komunikace

*Mach-Zehnder interferometer as a  
modulator for optical communications*

„Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě, dne 5. 4. 2011

.....

Tímto bych rád poděkoval prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, CSc., za cenné rady při zpracování diplomové práce. Především pak za to, jakým způsobem mě nasměroval k zadaným úkolům.

## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou použití Mach-Zehnderova interferometru jako modulátoru pro optické komunikace. V teoretické části diplomové práce jsou objasněny základní pojmy související se zadanou problematikou. Jsou zde podána vysvětlení pojmů, jako je interference světla, principy superpozice vlnění, koherence záření a zdroje koherentního záření. Dále je v mé práci pojednáno o přístrojích založených na principu interference světla – interferometrech (typy interferometrů, princip činnosti přístrojů, rozsah použití). Se zadanou tématikou úzce souvisí také problematika analýzy signálu použitého v digitálních přenosech. Tato problematika je zpracována v kap. 3, kde jsou teoreticky rozebrány pojmy jako je diagram oka, Q-faktor, bitová chybovost kanálu BER, odstup signálu od šumu SNR. V kapitole 4 je teoretická část práce doplněna o téma modulátorů.

Praktická část diplomové práce je shrnuta v kapitole 5 Proměření vlastností Mach-Zehnderova interferometru. V této části je popsáno schéma zapojení měřeného okruhu, požadavky kladené na jednotlivé komponenty použité v daném zapojení, naměřené hodnoty a vyhodnocení výsledků měření.

Celá práce je sestavena jako souhrn teoreticky známých faktů vztažených k zadaným úkolům diplomové práce doložených konkrétními výsledky získanými měřením na experimentální sestavě.

**Klíčová slova:** *Mach-Zehnder, interferometr, diagram oka, bitová chybovost kanálu, modulátor*

## ABSTRACT

This thesis deals with the problems of application of Mach-Zehnder interferometer as a modulator for optical communications. The theoretical part of the thesis includes explanations of basic terminology used in this subject area, namely the concept of light interference, the principles of superposition of oscillation, radiation coherence and coherent radiation sources. It is followed by description of apparatus based on the principle of light interference – i.e. interferometers (their types, the principles on which they work and the range of their usage). The subject area is closely connected with the problems of analysis of the signal used in digital transfer, which is dealt with in chapter 3. The concepts of eye pattern, Q-factor, bit error rate of BER channel or the separation between signal and SNR noise are analysed here. The theoretical part is completed by chapter 4, dealing with modulators.

The practical part of the thesis is summarised in chapter 5 called Measurement of Mach-Zehnder Interferometer Properties. It includes the circuit diagram, requirements upon the individual components used in the circuit, measured data and their evaluation.

The whole work is a compilation of known facts relating to the set tasks, followed by concrete results gained by measurement on experimental set of apparatus.

**Keywords:** *Mach-Zehnder, interferometer, eye diagram, bit error rate, modulator*

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

DFB	Distributed Feed Back
PRBS	Pseudorandom binary sequence
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
MASER	Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation
DC	Direct Current
USA	United States of America
RMS	Root Mean Square
LD	Laser diode
MZ	Mach-Zehnder
D	Detector
OSC	Oscilloscope
BER	Bit Error Rate
SNR	Signal-to-Noise Ratio

OBSAH:

<b>ÚVOD.....</b>	<b>3</b>
<b>1 INTERFERENCE.....</b>	<b>4</b>
1.1 Interference obecně .....	4
1.2 Interference světla .....	5
1.3 Princip superpozice .....	6
1.4 Koherence záření.....	10
1.4.1 Časová koherence .....	10
1.4.2 Prostorová koherence.....	11
1.4.3 Koherentní zdroje .....	12
<b>2 INTERFEROMETRY.....</b>	<b>17</b>
2.1 Interferometry a jejich vývoj.....	17
2.2 Typy interferometrů .....	18
2.2.1 Michelsonův interferometr .....	18
2.2.2 Jaminův interferometr.....	19
2.2.3 Mach-Zehnderův interferometr.....	20
2.2.4 Fabry-Perotův interferometr .....	23
<b>3 DIAGRAM OKA .....</b>	<b>24</b>
3.1 Sestavení diagramu oka.....	25
3.2 Q-faktor .....	26
3.3 BER (bitová chybovost kanálu) .....	27
3.4 SNR (odstup signálu od šumu) .....	29
<b>4 MODULÁTORY.....</b>	<b>30</b>
4.1 Elektrooptické modulátory .....	30
4.2 Akustooptické modulátory .....	31
4.3 Magnetooptické modulátory .....	32
<b>5 PROMĚŘENÍ VLASTNOSTÍ MACH-ZEHNDEROVA MODULÁTORU ..</b>	<b>33</b>
5.1 Schéma zapojení měřeného okruhu .....	33
5.2 Katalogové hodnoty MZ modulátoru.....	36
5.3 Zobrazení výstupu na detektoru .....	37

5.4	Naměřené hodnoty .....	38
5.4.1	Měření amplitudově-frekvenční charakteristiky.....	38
5.4.2	Měření fázového posuvu vlnění v MZ modulátoru .....	41
5.4.3	Diagram oka.....	44
5.5	Zhodnocení výsledků .....	47
<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>		<b>48</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>		<b>51</b>
<b>SEZNAM TABULEK.....</b>		<b>53</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>		<b>54</b>

## ÚVOD

Úkolem diplomové práce je zpracování problematiky použití Mach-Zehnderova interferometru jako modulátoru pro optické komunikace. Teoretická část diplomové práce si klade za cíl objasnit základní pojmy související se zadanou problematikou. V praktické části je úkolem navrhnout a realizovat experimentální sestavu Mach-Zehnderova interferometru s elektrooptickým modulátorem a dále změřit frekvenční rozsah modulátoru a specifikovat vlivy na velikost tohoto rozsahu.

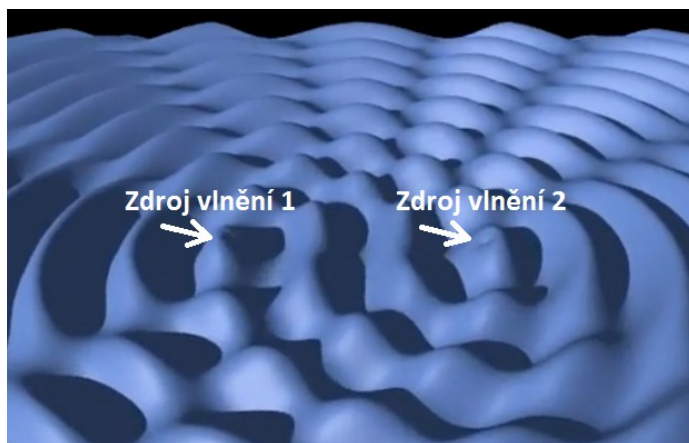


# 1 INTERFERENCE

## 1.1 Interference obecně

Interferenční jev neboli interference je definován jako vzájemné ovlivňování, prolínání nebo střetávání jevů či hmoty. S pojmem interference se nejčastěji setkáme při zkoumání charakteristických vlastností vln. Při pohybu vln dochází k jejich vzájemnému zesilování, nebo naopak ke vzájemnému rušení. Zobrazit lze takovéto vlny pomocí interferenčního obrazu (interferenčního obrazce), ze kterého jsou patrné projevy střídajícího se zesilování a zeslabování.

Interferenční jev je možné pozorovat např. při současném pádu dvou kamenů na vodní hladinu. Dojde zde ke vzniku dvou kruhových vln, které se navzájem překrývají. Při svém pohybu se tyto vlny neovlivňují a šíří se navzájem nezávisle. V místech, kde se vlny překrývají, je možno pozorovat, že amplitudy jednotlivých vln mají různou velikost. Některá místa vodní hladiny se rozkmitají na větší amplitudu výchylky, jiná místa mohou zůstat téměř v klidu. Tento jev je způsoben tím, že obě vlnění se při vzájemné interakci složí do jednoho výsledného vlnění. Tento děj, při kterém dochází ke skládání dvou nebo více vlnění, je nazýván interference vlnění. Na obr. 1 je patrné vzájemné ovlivňování vln generovaných ze dvou zdrojů.



Obrázek 1: Interference vlnění

Obecný pojem interference je velmi široký. Jeho výskyt a praktické využití zahrnuje mnoho různých oblastí lidského života. V oblasti využití tohoto jevu ve fyzice a následně v technice je možné zmínit interference různých vlnění, jako interference světla, zvuku nebo třeba

mechanického vlnění. Využití interference je však možné nalézt i v oblastech genetiky, biologie a lékařství nebo také v psychologii. V dalším textu jsou rozebrány pojmy z oblasti, které se týká tato diplomová práce, to znamená interference světelného vlnění.

## 1.2 Interference světla

Podstata jevu zvaného interference (z lat. *inter* = navzájem, *fero* = udeřím), čili skládání vlnění, byla vyložena již v předešlé kapitole. Vlnění, která přicházejí do určitého bodu z různých zdrojů, popř. ze stejného zdroje, ale po různých drahách, se v tomto bodě navzájem skládají. V případě mechanického vlnění to znamená, že se sčítají okamžité výchylky. V případě elektromagnetického vlnění (světla) se sčítají okamžité hodnoty elektrické složky a magnetické složky elektromagnetických vln.

Při interferenci mechanického vlnění je možné pozorovat zesilování a zeslabování vln v místech interferenčních maxim a minim. Podle tohoto principu by bylo možno usuzovat, že projevem interference světla bude rovněž jeho zesilování a zeslabování v různých bodech prostoru. Při použití běžných, tzv. přirozených zdrojů světla jako jsou slunce, žárovka, plamen však tento jev nelze pozorovat. Pozorovatelná interference světla totiž nastává pouze v případě splnění základního předpokladu, kterým je koherence světelného vlnění. Koherentní jsou světelná vlnění se stejnou frekvencí, jejichž vzájemný fázový rozdíl v uvažovaném bodě prostoru se s časem nemění. [23]

Intenzita superpozice dvou či více vln obecně není prostým součtem intenzit jednotlivých vln z důvodu interference vznikající mezi vlnami. Pokud tedy je první vlna dána

$$U_1 = \sqrt{I_1} \cos(\phi_1), \quad (1.1)$$

kde  $I_1$  je intenzita vlny, a  $\phi_1$  je její fáze, a totéž pro druhou vlnu

$$U_2 = \sqrt{I_2} \cos(\phi_2). \quad (1.2)$$

Potom je celková intenzita dána tzv. interferenční rovnicí

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(\phi), \quad (1.3)$$

kde fázový rozdíl vln je dán

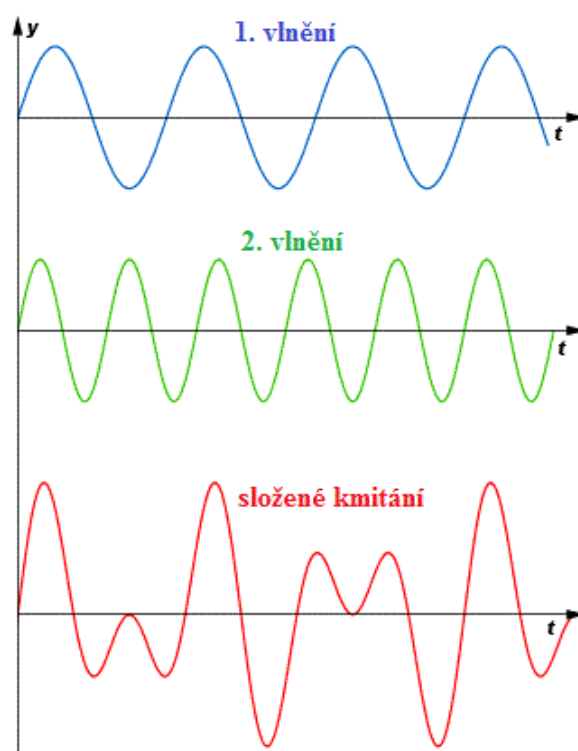
$$\phi = \phi_2 - \phi_1. \quad (1.4)$$

K lepšímu pochopení metod, které se zabývají jevy související s interferencí světla a jejího využití, je nutné vysvětlit princip superpozice a blíže popsat problematiku koherentních zdrojů. [2][7][22]

### 1.3 Princip superpozice

Pokud jsou kdekoli v prostoru přítomny dvě nebo více vln, je možné obecně konstatovat, že výsledná vlna je součtem jednotlivých vln. Kmitání jednotlivých míst pružného prostředí, v nichž vlnění interferují, se řídí principem superpozice. Okamžitá výchylka výsledného kmitání určitého bodu prostředí se rovná součtu okamžitých výchylek kmitání způsobených šířením jednotlivých vlnění. Proto se mohou vlnění interferencí zesilovat nebo zeslabovat či dokonce navzájem zcela rušit. Vznikají tzv. interferenční maxima a minima, jejichž rozmístění v pružném prostředí závisí na vlastnostech skládaných vlnění a na vzdálenostech zdrojů vlnění. [14]

Výsledná vlna složená z jednotlivých vln může mít různý průběh, který je závislý na parametrech původních vln. V jednoduchých případech má průběh harmonický, v ostatních případech neharmonický, i když oba skládané pohyby jsou harmonické. Mají-li obě vlnění stejné parametry, pak harmonické kmitání obou vlnění má stejnou frekvenci a výsledné kmitání je rovněž harmonické. Při nestejných parametrech vlnění je jejich frekvence různá a výsledné kmitání (obr. 2) je sice periodické, avšak není harmonické. [22]

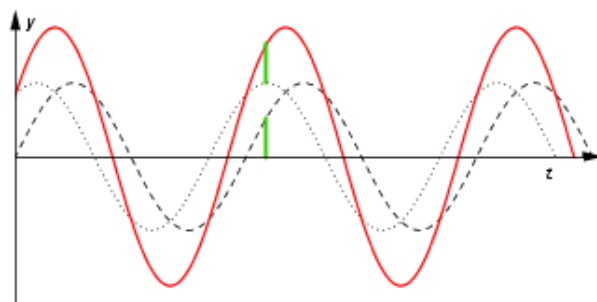


Obrázek 2: Složené kmitání

Matematické postupy pro zjišťování výsledného kmitání jsou poměrně složité, zvláště při různých frekvencích, amplitudách a počátečních fázích skládaných harmonických pohybů. Obecně platí princip superpozice: Koná-li hmotný bod současně dva nebo více harmonických pohybů v jedné přímce s okamžitými výchylkami  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , je okamžitá výchylka výsledného kmitání dána vztahem

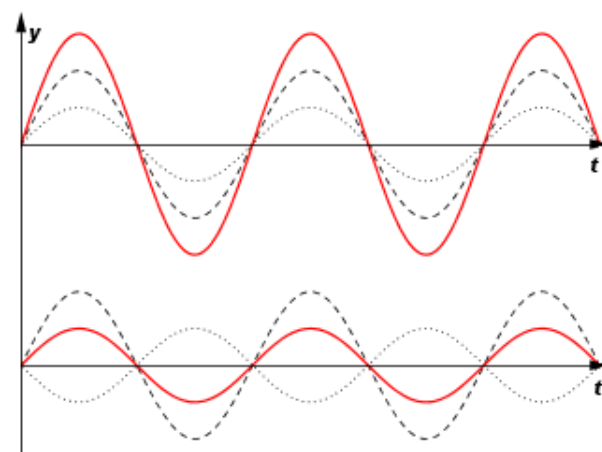
$$y = y_1 + y_2 + \dots + y_n. \quad (1.5)$$

Na principu superpozice je založeno grafické skládání harmonických pohybů. V časovém rozvinutí dvou harmonických pohybů je možné postupně sčítat (popř. odečítat) jejich okamžité výchylky v jednotlivých časových okamžicích, čímž dostaneme okamžité výchylky výsledného pohybu. Následným spojením jejich koncových bodů vznikne časový průběh výsledného kmitání (obr. 3).



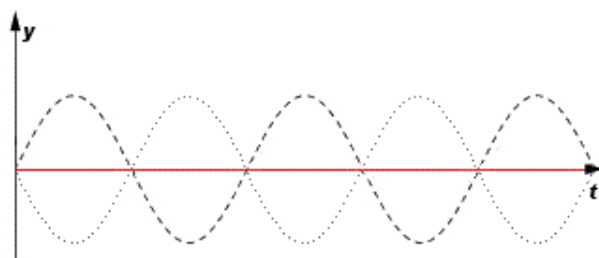
Obrázek 3: Výsledné kmitání dvou vlnění

Skládáním dvou harmonických kmitání stejného směru a o stejné frekvenci vzniká opět harmonické kmitání téže frekvence (obr. 4). Jeho amplituda závisí na fázovém rozdílu složek.



Obrázek 4: Výsledné kmitání dvou vlnění se stejnou a opačnou fází

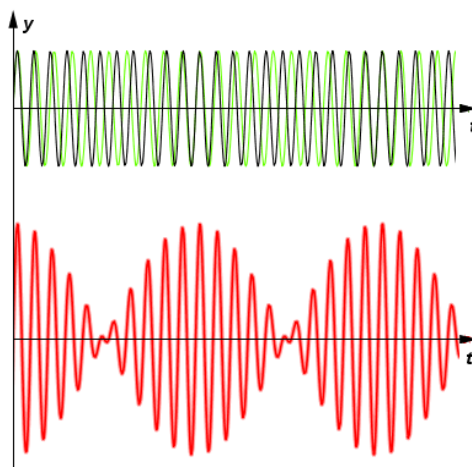
Pokud je fázový rozdíl obou původních vln nulový ( $\Delta\phi = 0$ ), tzn. při stejné počáteční fázi obou složek, je amplituda složeného kmitání největší. Složené kmitání má stejnou počáteční fázi jako složky. Je-li fázový rozdíl  $\Delta\phi = \pi$ , tj. při opačné fázi obou složek, pak je amplituda výsledného kmitání nejmenší. Složené kmitání má stejnou počáteční fázi jako složka s větší amplitudou. Pokud mají původní vlny stejnou amplitudu, je výchylka nulová a kmitání zaniká (obr 5).



Obrázek 5: Výsledné kmitání dvou vlnění se stejnou amplitudou ale opačnou fází

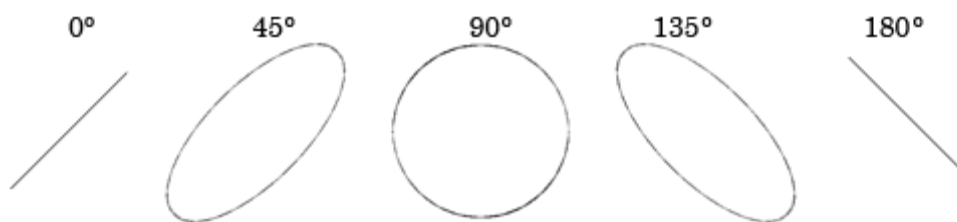
Superpozicí kmitání různé frekvence vzniká složené kmitání, které není harmonické. Kmitání však může být periodické a to v případě, že v poměru jejich period, popř. frekvencí, jsou celá čísla.

Pokud se úhlové frekvence složek velmi málo liší, nastává zvláštní případ interference. Z níže uvedeného obrázku je patrné, že amplituda výsledného kmitání se periodicky zvětšuje a zmenšuje. V tomto případě vzniká složené kmitání, nazývané rázy neboli zázněje (obr. 6). Amplituda rázů se mění s frekvencí, platí vztah  $f = f_1 - f_2$ . To znamená, že při postupném přibližování frekvencí obou kmitání se frekvence rázů zmenšuje. Pro  $f_1 = f_2$  rázy zaniknou. Rázy jsou velmi citlivým indikátorem pro sladění dvou současně znějících tónů. Pokud rázy vymizí, jsou oba tóny dokonale sladěny.



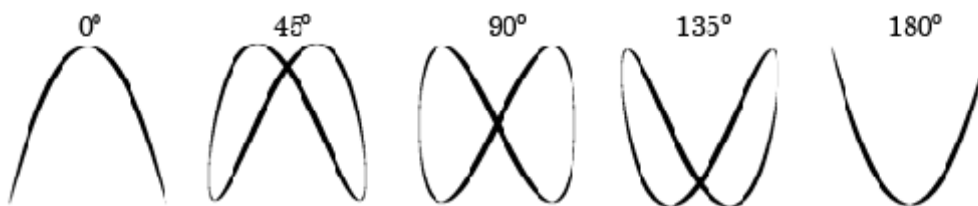
Obrázek 6: Zázněje

Lissajousovy křivky vznikají, jestliže se kmity dějí v přímkách navzájem kolmých a frekvence  $f$  jsou v poměru celých čísel. Tyto křivky jsou nazývané podle svého objevitele, profesora fyziky na lyceu Saint-Louis v Paříži, Julesa A. Lissajouse. Pokud bude dodržena podmínka, že vlnění, které je na sebe kolmé, má stejnou frekvenci a amplitudu, pak Lissajousovy křivky pro různé fáze posunutí mají tvary znázorněné na obr. 7.



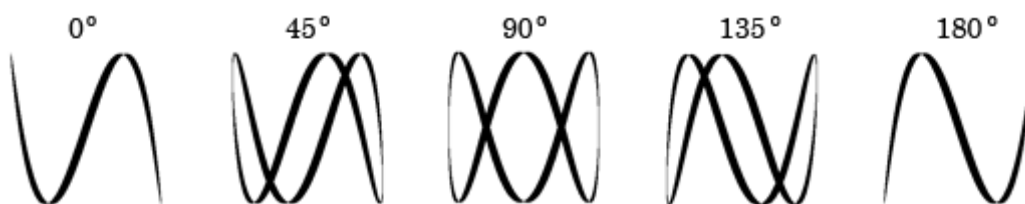
Obrázek 7: Lissajousovy obrazce pro frekvence v poměru 1:1

Při poměru kmitů 2:1 (pokud jsou tyto frekvence navzájem kolmé a mají stejnou amplitudu) vypadají obrazce, pro jednotlivé fázové posuny, podle obr. 8.



Obrázek 8: Lissajousovy obrazce pro frekvence v poměru 2:1

Pro porovnání jsou na obr. 9 uvedeny ještě frekvence, které jsou v poměru 3:1



Obrázek 9: Lissajousovy obrazce pro frekvence v poměru 3:1

Pro lepší pochopení problematiky Lissajousových obrazců existuje na internetu několik appletů.  
[5][3][13][10]

## 1.4 Koherence záření

Při interferenci mechanického vlnění je možno pozorovat zesilování a zeslabování vln v místech interferenčních maxim a minim. V případě světelného záření je možné obdobný jev interference pozorovat pouze v tom případě, že se jedná o světelná vlnění se stejnou frekvencí, jejichž fázový rozdíl v uvažovaném bodě prostoru se s časem nemění. Taková dvě vlnění se nazývají vlnění koherentní (z latinského cohaere = souviset). Pokud dvě vlnění nejsou koherentní, nelze interferenci pozorovat.

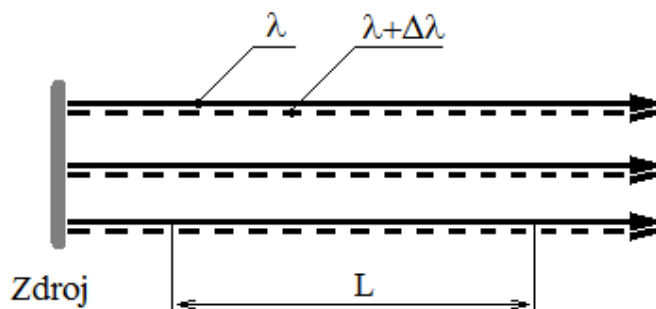
Použití koherentních zdrojů záření je nezbytnou podmínkou v celé řadě optických měřicích metod, které vyžadují pro svou funkci kvalitní zdroje záření. Důležitým parametrem kvality zdroje záření pro interferometrii, holografii, ale i pro jiné optické měřicí metody je právě koherence záření. Koherentní zdroje jsou definovány jako zdroje, jejichž frekvence záření je stále stejná a rozdíl fází vyzařovaných paprsků se nemění. V literatuře bývá uváděn tzv. komplexní stupeň koherence, který zahrnuje koherenci časovou a koherenci prostorovou. Zlepšení koherenčních vlastností lze dosáhnout zvýšením monochromatickosti a ohraničením velikosti zářící plochy zdroje. Pod pojmem monochromatické světlo se rozumí světlo se stejnou vlnovou délkou, resp. frekvencí záření. Monochromatickost záření ovlivňuje koherenci časovou, velikost zářící plochy zdroje ovlivňuje koherenci prostorovou. [22]

### 1.4.1 Časová koherence

Ideální koherentní zdroj záření by měl v každém okamžiku a z celého povrchu vyzařovat monochromatické záření. Je-li generováno záření s konečnou šířkou spektrální čáry, jehož vlnová délka leží v intervalu  $\lambda + \Delta\lambda$ , bude docházet při interferenci paprsků o vlnové délce  $\lambda$  s paprsky o vlnové délce  $\lambda + \Delta\lambda$  k zánějům ve směru šíření záření, viz obr. 10. Vzdálenost zánějů je možno označit jako koherenční délku  $L$ . Tato délka, která vyjadřuje schopnost zdroje generovat stacionární záření se stálou fází ve sledovaném bodě, je dána vztahem

$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = \frac{c}{\Delta f}. \quad (1.6)$$

V rovnici představuje  $c$  rychlost šíření záření a  $\Delta f$  je změna frekvence zdroje vyzařujícího v intervalu vlnových délek  $\lambda + \Delta\lambda$ .



Obrázek 10: Časová koherence - zdroj vyzařující záření o vlnové délce v intervalu  $\lambda + \Delta\lambda$

Při aplikaci zdroje záření s konečnou koherenční délkou je třeba mít na zřeteli, že kvalitní interferenci lze získat pouze superpozicí takových paprsků, jejichž optické dráhy (měřeno od zdroje záření) se příliš od sebe neliší a jejich rozdíl by měl být podstatně menší než koherenční délka  $L$ .

### 1.4.2 Prostorová koherence

Prostorová koherence je pojem, který lze vyjádřit pomocí tzv. koherenční šířky. Koherenční šířka je vzdálenost  $R$  na stínítku (obr. 11) mezi osou svazku a místem, ve kterém dostaneme při interferenci paprsků šířících se od okraje monochromatického plošného zdroje minimum intenzity (optická dráha těchto paprsků se liší o  $\lambda / 2$ ). Koherenční šířka je především funkcí příčné velikosti zdroje  $2r$ , vlnové délky  $\lambda$  a mění se se vzdáleností stínítka od zdroje  $a$ . Pro výše uvedené veličiny platí vztah

$$\frac{\lambda}{2} = \sqrt{a^2 + (R + r)^2} - \sqrt{a^2 + (R - r)^2}. \quad (1.7)$$

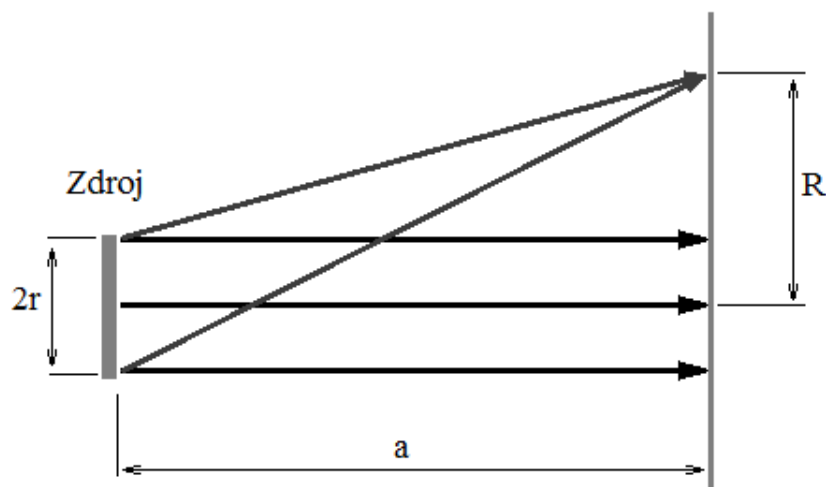
Protože velikost zdroje  $2r$  bývá podstatně menší než vzdálenost  $a$  stínítka od zdroje, lze daný vztah zjednodušit na tvar

$$\frac{\lambda}{2} = \left[ a + \frac{(R+r)^2}{2a} \right] - \left[ a + \frac{(R-r)^2}{2a} \right]. \quad (1.8)$$

Po úpravách lze vyjádřit koherenční šířku  $R$  ve tvaru

$$R = a \frac{\lambda}{4r}. \quad (1.9)$$





Obrázek 11: Prostorová koherence - zdroj konečné velikosti

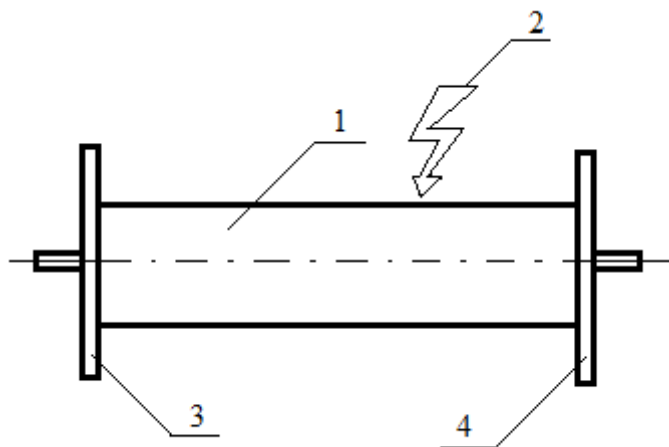
Z výše uvedených vztahů vyplývá, že při aplikaci zdroje záření s reálnou velikostí  $2r$  lze osvětlovat ve vzdálenosti  $a$  od zdroje pouze objekty, které mají rozměr příčný k ose záření podstatně menší než  $2R$ , jinak se začne projevovat interference paprsků šířících se od okraje monochromatického zdroje, která může ovlivnit interferenci s případným dalším svazkem. Velké hodnoty koherenční šířky je možné dosáhnout především u laserů, kde velikost zdroje  $2r$  je oproti jiným zdrojům záření zanedbatelná, a proto lze lasery považovat prakticky za bodové zdroje záření. [21]

### 1.4.3 Koherentní zdroje

Nezbytnou podmínkou pro praktické využití jevů spojených s interferencí světla je existence koherentních zdrojů záření. Koherentní elektromagnetické záření má velmi malou rozbíhavost paprsku a díky vysoké monochromatickosti má možnost zaostření (fokusace) do velmi malé plošky a tím soustřeďuje velké množství energie. Zdroje takového záření představují v současné době masery a lasery. Jedná se o přístroje na výrobu velmi koherentního a monochromatického elektromagnetického záření, díky kterým došlo v posledních šedesáti letech k obrovskému technologickému pokroku v oboru optiky.

Laser resp. jeho předchůdce Maser jsou nejdokonalejšími a nejrozšířenějšími zdroji takového elektromagnetického záření. Fyzikální princip obou přístrojů je stejný, liší se pouze frekvenční oblast vystupujícího záření a z toho vyplývajícími rozdíly v technologických detailech. Tyto technologické detaily byly hlavním problémem výroby prvního plně funkčního laseru. K fyzikálnímu popisu musela být použita kvantová elektronika, za kterou sovětští fyzici

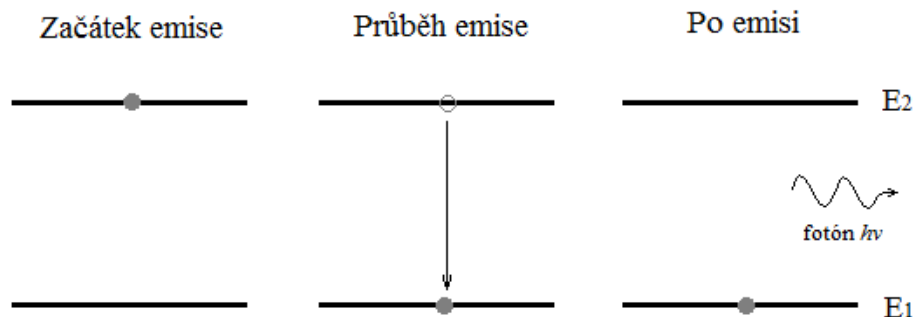
Nikolaj Basov a Alexandr Prochorov spolu s konstruktérem prvního maseru (1953), Charles Townesem, dostali v roce 1964 Nobelovu cenu za fyziku. Prototyp prvního vyrobeného maseru však nedokázal pracovat nepřetržitě. Teprve v roce 1960 předvedl v USA již plně funkční laser Theodore H. Maiman (1927-2007), který je proto považován za vynálezce tohoto přístroje. V současné době nalezly tyto přístroje široké uplatnění v mnoha odvětvích. Jsou používány v běžných technických aplikacích (řezání, svařování, přesné měření), v lékařství, ve speciálních oborech jako kosmonautika, vojenská technika, v řadě vědeckých pokusů a samozřejmě také jako koherentní zdroje pro optické komunikace. Princip těchto přístrojů je přes širokou škálu druhů a praktického použití společný. Laser (obr. 12) je tvořen aktivním prostředím [na obrázku označeno 1], zdrojem [2] a rezonátorem [3,4].



Obrázek 12: Struktura laseru

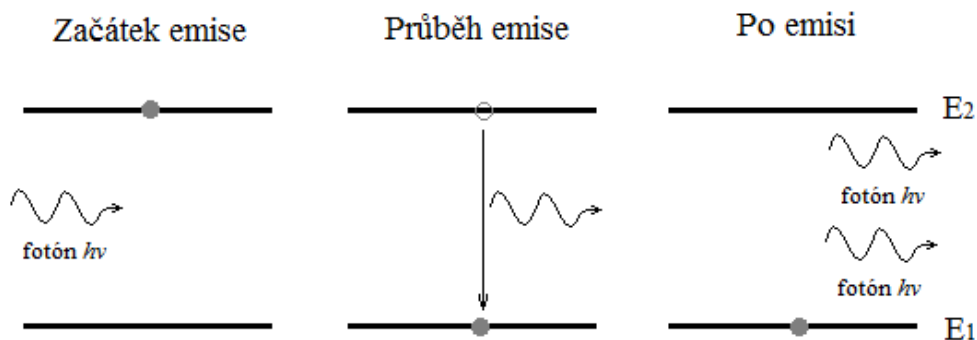
Aktivní prostředí je látka, ve které vzniká zdroj fotonů. V této látce dochází k excitaci elektronů do vyšších energetických hladin. Po opětovném přeskočení elektronů na základní energetické hladiny dochází k emisi fotonů. Lasery můžeme podle druhu použitého aktivního prostředí rozdělit do několika základních skupin: plynové, pevnolátkové, polovodičové nebo diodové, kaskádní a lasery na volných elektronech. Rozlišujeme dva základní mechanismy emise daných fotonů, spontánní a stimulovaná emise.

*Spontánní emise* - v tomto případě dochází ke kvantovému vyzáření z excitovaného elektronu při přeskočení na základní energetickou hladinu. Vyzářený foton má energii danou přesně energetickým rozdílem těchto hladin. Má ovšem náhodný směr, polarizaci a fázi. Tato emise se nazývá luminiscence nebo fluorescence. Nedojde-li k tomuto zářivému přechodu z důvodu absorpce uvolněné energie například ve formě tepla, hovoří se o rekombinaci. Celý proces je zobrazen na obr. 13.



Obrázek 13: Princip spontánní emise

*Stimulovaná emise* - je velmi důležitá pro funkčnost laseru. Teoreticky ji předpověděl již v roce 1917 A. Einstein a pozorováním potvrdil v roce 1928 R. W. Landenburg společně s H. Kopfermannem. Jedná se opět o kvantový jev, při kterém dopadající částice (nejčastěji foton) stimuluje přechod excitovaného elektronu do základního stavu za současného vyzáření dalšího fotonu se stejnými vlastnostmi jako má stimulující částice. Ke stimulované emisi musí dojít dříve, než elektron emituje spontánně ( $10^{-3}$  až  $10^{-7}$  s). Vyzářený foton má potom stejnou vlnovou délku, polarizaci a směr jako stimulující foton. Navíc díky této emisi roste lineárně počet vyzařovaných fotonů. Situace je popsána pomocí obr. 14. [17]



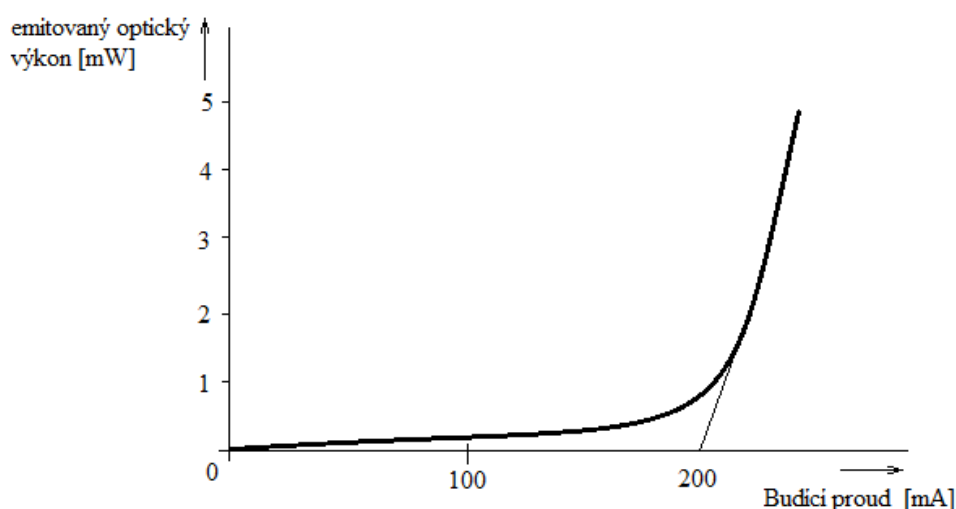
Obrázek 14: Princip stimulované emise

Nutnou podmínkou, aby k stimulované emisi docházelo, je dostatek excitovaných elektronů. Tento stav bývá nazýván inverzní populace. Za normálních okolností se intenzita světla při průchodu látkou snižuje, neboť počet atomů v základním stavu (označen jako  $N1$ ) je o mnoho vyšší než počet atomů v excitovaném stavu (označen jako  $N2$ ). K inverzní populaci dochází ve stavu, když  $N2 > N1$ . Většina laserů využívá právě této stimulované emise při inverzní populaci. Pravděpodobnost toho, že nastane stimulovaná emise, popisuje Einsteinův vztah

$$P = BN_2\varphi(n), \quad (1.10)$$

kde  $B$  je Einsteinův koeficient stimulované emise a  $\varphi(n)$  je hustota dopadajícího záření. [16]

Jako zdroj energie pro excitaci elektronů se nejčastěji využívá elektrický proud, který například přes výbojku dodává zdroj fotonů pro prvotní excitaci elektronů. Stimulovaná emise začíná v aktivním prostředí po dosažení stavu inverzní populace. K udržení tohoto stavu je potřeba neustále dodávat elektrickou energii, tzv. prahový proud  $I_p$ . Tento proces neustálého dodávání elektrické energie se nazývá čerpání. Různé typy laseru mají rozdílné způsoby čerpání. Na následujícím grafu (obr. 15) je znázorněna závislost optického výkonu laseru (resp. pravděpodobnost stimulované emise) na dodávaném čerpání elektrickým proudem.



**Obrázek 15: Závislost optického výkonu laseru na dodávaném čerpání elektrickým proudem**

Rezonátor je nejsložitější technologickou součástí laseru a spolu s čistotou aktivního prostředí je nejdůležitějším prvkem pro bezchybnou funkci laseru. Umístění aktivního prostředí mezi rezonátor způsobuje vícenásobnou stimulovanou emisi. Jako rezonátor se nejčastěji používají dvě rovnoběžná zrcadla. Od těchto zrcadel se paprsek odráží tam a zpět. Opětovným průchodem paprsku aktivním prostředím je podporována stimulovaná emise a narůstá počet fotonů. Takovému rezonátoru se říká tzv. Fabry-Perotův. Jde o určitou analogii s Fabry-Perotovým interferometrem neboť i zde dochází k této následné interferenci, která je pro laser důležitá.

Vlivem konstruktivní a destruktivní interference při odrazech paprsku od zrcadel rezonátoru dochází k ustálení (stacionární konfigurace) elektromagnetického pole tzv. modů či vidů. Mody mohou být tvořeny pouze zářeními o vlnových délkách takových, že rozměry rezonátoru lze vyjádřit jako celistvý násobek jejich poloviny. Jedná se tedy o charakter stojatých vln. Proto u některých laserů hovoříme o vyšších harmonických frekvencích.

Tento interferenční princip velmi pomáhá k zlepšení koherentnosti výsledného záření. Výstupní paprsek se pak propouští malým polopropustným zrcátkem uprostřed jednoho z rezonančních zrcadel. Každý druh laseru používá trochu jiný resonátor. Některé lasery mají tak silnou emisi, že resonátor dokonce ani nepotřebují. Tyto lasery bývají nazývány jako lasery pracující superradiačně. [4][8][2]

## 2 INTERFEROMETRY

### 2.1 Interferometry a jejich vývoj

Tyto přístroje jsou založeny na principu interference světla. Využívají se u několika aplikací, jako je měření délek (tzv. interferenční komparátory), k určení indexu lomu u plynů a kapalin (tzv. interferenční refraktometry) nebo k určení jemné struktury spektrálních čar (tzv. interferenční spektroskopy).

V této kapitole si uvedeme přehled vývoje v oblasti interferometrie. Důležité poznatky v oblasti vlnové teorie světla vyvinul Huygens v roce 1678. Huygens vyslovil myšlenku, že světlo je tvořeno vlněním (dnes je známá jako Huygensův princip). Tato myšlenka byla klíčová pro pochopení vnímání světla. Na tyto poznatky navázal na začátku devatenáctého století Thomas Young svým silným experimentálním důkazem. Ten provedl roku 1801, když nechal procházet svazek světla dvěma rovnoběžnými štěrbinami, za které umístil stínítko. Vlivem difrakce světla na štěrbinách vznikly na stínítku interferenční proužky. Z toho Young usoudil, že světlo má charakter vlnění. Tomuto anglickému fyzikovi se říkalo zázračné dítě. Možná proto, že podle dostupných informací přečetl dvakrát Bibli ve věku čtyř let, především však za svůj cenný příspěvek v této oblasti. Roku 1817 Young vyslovil domněnku, že světlo je vlnění, které má malou příčnou složku avšak že podélná složka je dominantní. Ne nadarmo je tento fyzik nazýván zakladatelem vlnové teorie.

Young dokázal při svých experimentálních důkazech o vlnové teorii vzbudit pozornost u mnoho vědců a fyziků. Mezi nejvýznamnější patří Augustin Fresnel, francouzský inženýr. Fresnelovi se roku 1821 podařilo matematicky ukázat, že polarizaci lze vysvětlit, pouze pokud světlo je úplně příčné, bez jakékoliv podélné složky. V letech 1814-1815 demonstroval vliv interference pomocí skleněného hranolu, byl také významným vědcem ve studiu difrakce světla. Po něm mnoho výzkumníků navázalo na jeho znalosti a vytvořilo několik užitečných optických přístrojů, zvaných interferometry.

Albert Abraham Michelson, brilantní americký fyzik, postavil vůbec první druh interferometru v roce 1881. Twyman, Green, Jamin, Haidinger, Mach Zehnder, Stokes a Rayleigh byli další fyzici, kteří přidali další důležité odborné příspěvky k lepšímu poznání interferometrů.

Při výzkumu interference světla fyzici báдали o jednom z nejdůležitějších aspektů vlnkoherenci. Vědci zjistili, že pouze koherentní vlny mohou produkovat stabilní interferenční obrazce, a že světelné vlny mají slabší koherenci než mikrovlny a rádiové vlny. Zásadní otázka

zněla, jak by mohla být koherence světla posílena. Einstein měl odpověď. V roce 1917 Einstein navrhl (teoreticky), že vysoce koherentní světelný paprsek je možné získat v případě, že přirozený mechanismus emise světla je řízen tak, že emise je spíše stimulovaná (řízená), než samovolná (neřízená). Výzkum v tomto směru vyvrcholil vývojem prvního praktického laseru, který v roce 1960 sestrojil Theodore H. Maiman. Před vyvinutím laseru byla optika často nazývána jako nekoherentní, po příchodu pak jako věk koherentní optiky. [2]

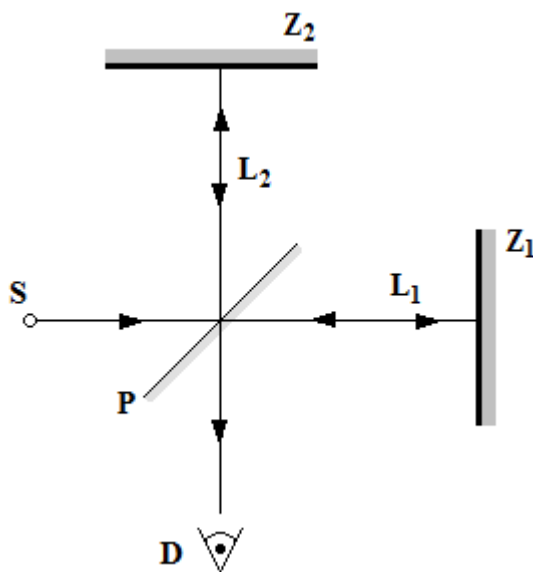
## 2.2 Typy interferometrů

Optické interferometry jsou přístroje pro velmi přesná měření, jejíž princip je založen na interferenci světla. Interferometry se dnes používají k měření délek (interferenční komparátory), k studování různých povrchů, k měření tlaku a teploty plynů nebo plazmatu, k určení indexů lomu u plynů a u kapalin (interferenční refraktometry), k určení struktury spektrálních čar (interferenční spektroskopy), k měření elektrického a magnetického pole, k měření rychlosti otáčení, k měření úhlového průměru hvězd a jako detekce gravitačních vln.

Jednotlivé interferometry dělíme podle počtu interferujících vln na dvousvazkové interferometry a vícesvazkové interferometry. Nejznámějšími dvousvazkovými interferometry jsou Michelsonův, Mach-Zehnderův a Sagnacův interferometr, nejznámějším vícesvazkovým interferometrem je Fabry-Perotův interferometr.

### 2.2.1 Michelsonův interferometr

Michelsonův interferometr je široce používaným přístrojem pro měření vlnové délky světla a k měření extrémně krátkých vzdáleností v případě, že je známa vlnová délka použitého světla. Princip přístroje je zobrazen na obr. 16. Paprsek světla z laseru S dopadá na polopropustné zrcadlo P pod úhlem  $45^\circ$ . Část světla se šíří původním směrem (paprsek  $L_1$ ) a po odrazu od zrcadla  $Z_1$  se vrací zpět k polopropustnému zrcadlu, na němž se opět odráží a dopadá na detektor D (stínítko). Druhá část světla (paprsek  $L_2$ ) se na polopropustném zrcátku odráží kolmo k dopadajícímu paprsku a, po odrazu od zrcadla  $Z_2$  a průchodu polopropustným zrcadlem P, dopadá také na detektor D. Oba paprsky mají stejnou fázi - interferují spolu, na stínítku se objeví maxima a minima ve formě světlých a tmavých kroužků.



Obrázek 16: Michelsonův interferometr

Pozorování interferenčních obrazců je realizováno pomocí posuvného zrcadla  $Z_1$ , pomocí kterého měníme velikost dráhy jednoho z paprsků. Poněvadž paprsek projde dráhu mezi deskou P a zrcadlem  $Z_1$  dvakrát (tam i zpět), posunutím  $Z_1$  o  $1/4 \lambda$  směrem k polopropustné desce P se optická dráha tohoto paprsku zmenší o  $1/2 \lambda$ . Tím se změní i interferenční obrazec tak, že interferenční maxima budou na místě minima a naopak.

Pomalým posunem pohyblivého zrcadla o vzdálenost  $d$  se změní počet interferenčních proužků o  $N$ , potom můžeme vlnovou délku  $\lambda$  použitého laseru vyjádřit pomocí vztahu

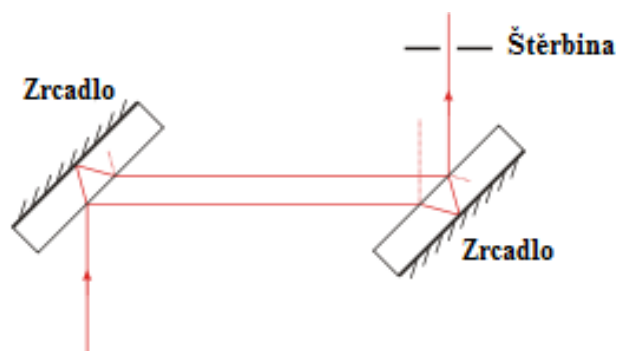
$$\lambda = \frac{2d}{N} \quad (2.1)$$

Změnou počtu interferenčních proužků rozumíme počet změn minima na maximum a následně opět na minimum nebo opačně. [16][14]

### 2.2.2 Jaminův interferometr

Tento interferometr byl vyvinut v roce 1856 francouzským fyzikem Julesem Jaminem. Zařízení se skládá ze dvou rovnoběžných zrcadel. Fresnelův odraz paprsku od prvního povrchu zrcadla se chová jako dělič. Dopadající světlo je rozděleno do dvou paprsků, které po odrazech na zrcadle postupují vůči sobě rovnoběžně. Vzdálenost těchto paprsků je dána šířkou zrcadla. Paprsky se následně spojí při odrazu od druhého zrcadla a nakonec se zobrazí na stínítku. Princip tohoto interferometru znázorňuje obr. 17.



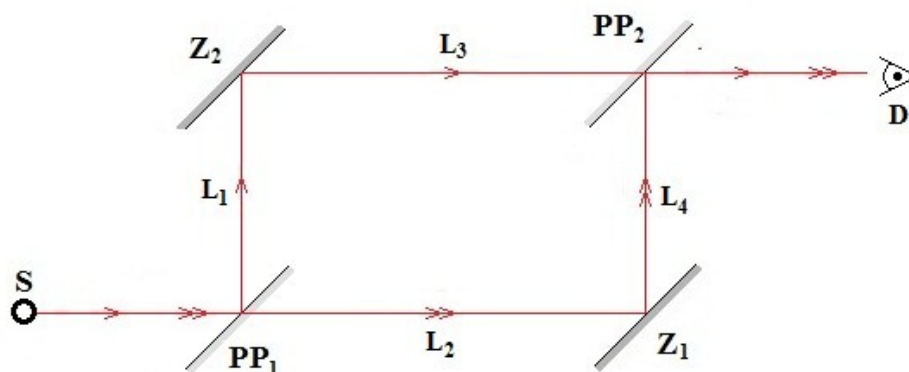


Obrázek 17: Jaminův interferometr

Tato metoda se používá při zjišťování indexu lomu. A to tím způsobem, že mezi dvě zrcadla se vloží trubice s plynem, u kterého zjišťujeme index lomu, a trubice s vakuem (index lomu = 1). Při měření porovnáváme optické dráhy paprsků, které prochází trubicemi. Trubice s plynem můžeme nahradit trubicemi s kapalinou. Toho se využívá například v lékařství při zjišťování kvality krevního séra.

### 2.2.3 Mach-Zehnderův interferometr

Detailněji se podíváme na interferometr zvaný Mach-Zehnderův. Princip tohoto interferometru je zobrazen na obr. 18. Paprsek z laserového zdroje dopadá na polopropustné zrcadlo  $PP_1$ . Toto zrcadlo nám rozdělí paprsek na dvě části. Část světla se odrazí k zrcadlu  $Z_2$  a část postupuje dále k zrcadlu  $Z_1$ . Tyto paprsky se opět sejdou v polopropustném zrcadle  $PP_2$ . V závislosti na fázovém rozdílu mezi oběma složkami dostaneme na výstupu interferometru interferenční obrazec obdobný jako v kterémkoliv jiném interferometru. Tento rozdíl fází pozorujeme na detektoru D.



Obrázek 18: Mach-Zehnderův interferometr

Fáze vlny, která prochází horním ramenem Mach-Zehnderova interferometru, se určí jako

$$\phi_1 = k(L_1 + L_3). \quad (2.1)$$

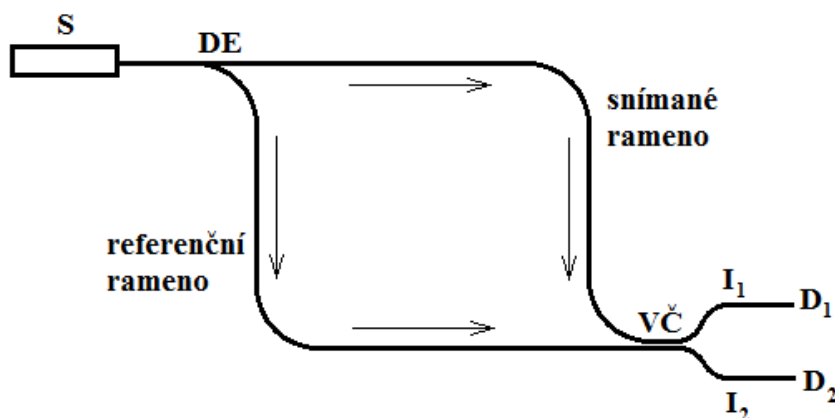
Obdobně můžeme zapsat fázi vlny šířící se spodním ramenem

$$\phi_2 = k(L_2 + L_4). \quad (2.2)$$

Fázový posun mezi vlnami procházejících po odlišných ramenech je potom dán jejím rozdílem

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 = 2k(L_2 + L_4 - (L_1 + L_3)). \quad (2.3)$$

Mach-Zehnderův interferometr nemusíme řešit jen pomocí soustavy zrcadel. Vláknově optický Mach-Zehnderův interferometr je určen především děličem (splitter), vazebním členem (coupler) a jako ramena se použijí optická vlákna. To nám ukazuje obr. 19. Toto řešení se hojně využívá jako čidlo pro detekci a měření různých vnějších parametrů, jako je teplota, tlak, napětí, magnetické pole apod.



**Obrázek 19: Vláknově optický Mach-Zehnderův interferometr**

Světlo z laseru S přichází do optického děliče D, který rozdělí paprsek rovnoměrně do obou paží jednomódových vláken. V obou vláknech, po průchodu paprsku děličem, se šíří polovina vstupního výkonu laseru. To znamená, že v obou vláknech klesne výkon o 3dB. Tyto paprsky, putující po různých ramenech, se opět spojí ve vazebním členu VČ. V tomto vazebním členu dochází ke skládání světelných vln z obou ramen, platí zde tzv. princip superpozice (viz. Kapitola 1.3).

Obě dvě ramena interferometru jsou detekovány a dále zpracovány. Jedním z ramen je rameno snímané, které je obvykle potažené materiálem citlivým na snímáný parametr. Druhé rameno, tzv. referenční, je chráněno od vnějších vlivů. Když na snímané vlákno působí nějaký externí podnět, který má za následek změnu délky snímaného ramene nebo v rameni dojde ke změně indexu lomu, změní se i fáze světla. Naopak u referenčního vlákna, tím že je dobře

chráněno od okolí, k těmto změnám nedochází. Porovnáním světelné vlny na výstupu je stanoven fázový rozdíl mezi oběma paprsky  $\Delta\phi$ . Změřením intenzity na výstupu můžeme dostat parametr, který má být určen. Pro výstupní intenzitu  $I_1$  platí

$$I_1 = I_0 \sin^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right). \quad (2.4)$$

Obdobně zapíšeme i výstupní intenzitu  $I_2$

$$I_2 = I_0 \cos^2\left(\frac{\Delta\phi}{2}\right), \quad (2.5)$$

kde  $I_0$  je vstupní intenzita.

Z rovnice (2.5) je vidět, že intenzita v libovolném bodě závisí na fázovém rozdílu mezi oběma paprsky. Pokud tedy fázový rozdíl  $\phi$  je celočíselným násobkem  $2\pi$ , pak je intenzita maximální. Pokud ovšem fázový rozdíl  $\phi$  je celočíselným násobkem  $\pi$ , pak je intenzita nulová. To znamená, že intenzita v každém bodě na detektoru (stínítku) závisí na fázovém rozdílu paprsků procházejícími dvěma rameny interferometru. Jakýkoliv externí zásah může ovlivnit světlo šířící se rameny interferometru, změní se rozdíl fází  $\Delta\phi$  (2.6) a tím i samotný interferenční obrazec.

$$\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \quad (2.6)$$

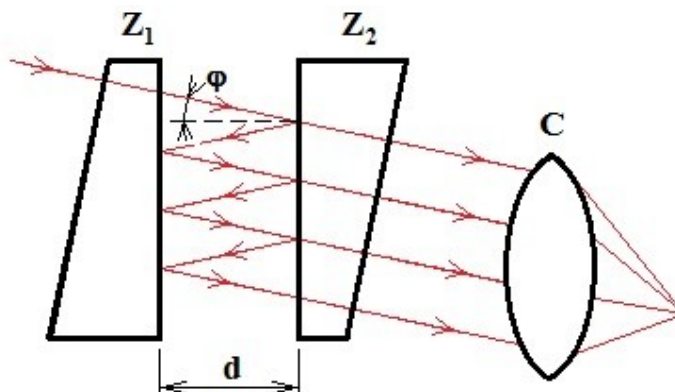
Jestliže paprsek z referenčního ramene a ze snímaného ramene zavádí totožný fázový posun ( $\Delta\phi=0$ ), pak detekujeme pouze intenzitu  $I_2$ . Naopak pokud je fázový posuv světelných vln mezi referenčním ramenem a snímaným ramenem roven  $\Delta\phi=\pi$ , pak na detektoru snímáme pouze intenzitu  $I_1$ . Tato vlastnost vyplývá ze vzorců (2.4) a (2.5), neboť víme, že  $\cos(0)=1$  a  $\sin(0)=0$ . Vstupní intenzita  $I_0$  je potom dána součtem výstupních intenzit.

$$I_0 = I_1 + I_2 \quad (2.7)$$

V senzorech využívající princip Mach-Zehnderova interferometru dochází k tomu, že vnější rušení obvykle vyvolá velmi malé změny  $\Delta\phi$  (mili až mikroradiány) mezi oběma vlnami. Vzhledem k teplotě a kolísání tlaku dochází k situaci, kdy změna fáze je posunuta s časem. To vede k zeslabování signálu. Proto se obvykle využívá aktivní regulátor umístěný v referenčním rameni interferometru, který udrží pozici světelné vlny bez fázového posunu. Tento regulátor je většinou tvořen způsobem, kdy optické vlákno referenčního ramene je namotáno na piezoelektrický válec. Když na válec přivedeme napětí, válec zvětší svůj objem. Následkem je natažení optického vlákna, což vede k řízené změně fáze  $\Delta\phi$ . [1][14]

### 2.2.4 Fabry-Perotův interferometr

Fabry-Perotův interferometr patří do kategorie tzv. vícesvazkových interferometrů. Základní princip tohoto interferometru spočívá v interferenci mnoha paprsků na planoparalelní vzduchové vrstvě. Do prostoru mezi zrcadly  $Z_1$  a  $Z_2$  vchází paprsky světla a odrážejí se podle schématu na obr. 20. Při každém odrazu je část paprsku propuštěna.

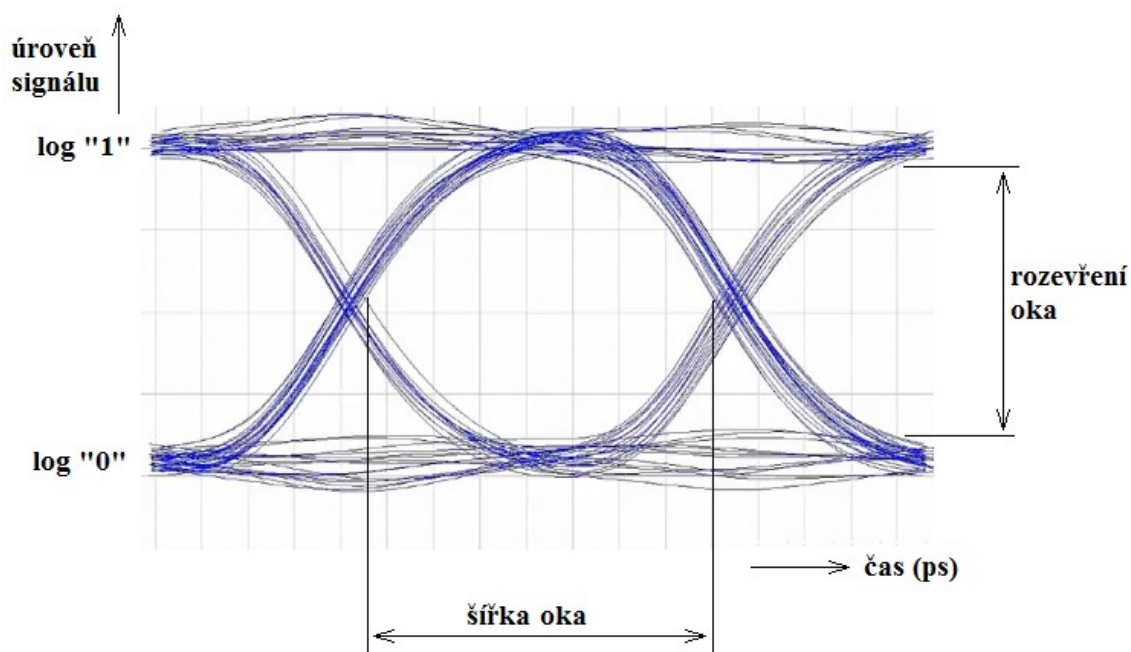


Obrázek 20: Fabry-Perotův interferometr

Protože všechny propuštěné paprsky vychází z jednoho dopadajícího paprsku, mají stejnou fázi (za předpokladu, že jsou použity vysoce koherentní zdroje). Přivrácené stěny hranolů jsou rovnoběžné a je na nich nanesena polopropustná vrstva, odvrácené stěny jsou vybroušeny pod určitým úhlem tak, aby se zamezilo nežádoucím interferencím. Fázový rozdíl mezi propouštěnými paprsky závisí na úhlu  $\varphi$ , pod kterým vchází do dutiny a na vzdálenosti mezi dvěma zrcadly. Změnou vzdálenosti hranolů  $d$  měníme dráhové rozdíly interferujících paprsků, což se projeví změnami v pozorovaném interferenčním obrazci posunem interferenčních proužků. [3][12][7][22]

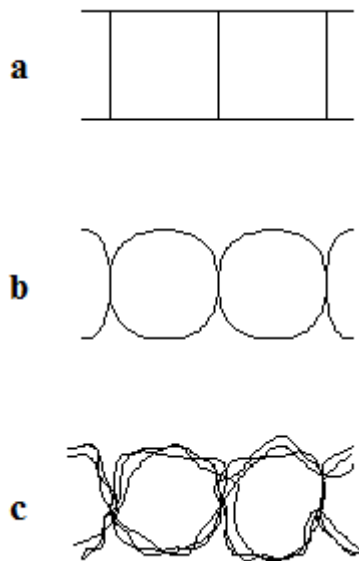
### 3 DIAGRAM OKA

Diagram oka je v telekomunikacích hojně využívaná metoda k pozorování a analýze signálu použitého v digitálních přenosech. Tento diagram můžeme pozorovat na displeji osciloskopu. Vertikální osa diagramu nám znázorňuje úroveň digitálního signálu, horizontální osa je dána časem, ve kterém se mění úroveň logické „1“ a logické „0“. Základní parametry, které se u diagramu určují, je otevření oka a šířka oka. Otevření oka charakterizuje vzdálenost mezi úrovní log. 1 a log. 0. Čím je otevření oka větší, tím je pravděpodobnost vzájemné záměny log. 1 a log. 0 menší. Šířka oka nám říká, jaká je vzdálenost mezi krajními polohami impulsů. Názorně je takovýto diagram oka znázorněn na obr. 21.



Obrázek 21: Diagram oka

Komunikační kanál je obvykle realizován koaxiálním kabelem, který propojuje komunikační body (zdroj a cíl). Průběh přenášených dat přes kabel je ovlivněn hlukem, mezisymbolovou interferencí, šumem, či nedokonalým přechodem hran (logických nul a jedniček). K pozorování takovýchto rušících elementů komunikačního kanálu se právě využívá diagram oka. V obr. 22 je ukázáno, jak jsou jednotlivé přechody zobrazovány v ideálním případě (a), kdy čas přechodu mezi stavy je roven nule, v reálném případě (b), a v reálném případě při zkreslení (c).

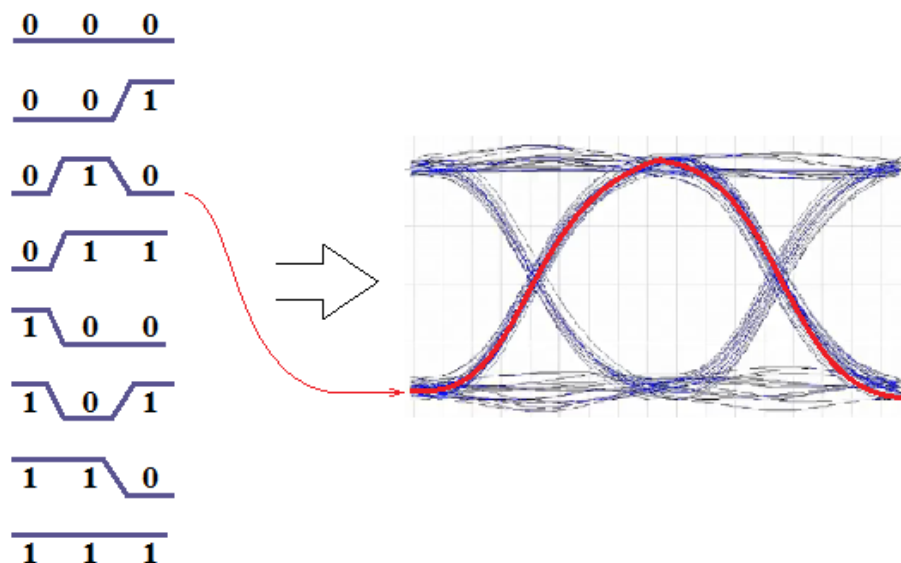


**Obrázek 22: Diagram oka v ideálním případě (a), v reálném případě (b) a v reálném případě při zkreslení (c)**

Chyba nastane, pokud je oko prakticky zavřené, nebo je-li okamžik vzorkování posunut v důsledku fázového neklidu. Diagram nám na základě analýzy odvozuje určitá opatření systému. Pomocí diagramu oka mohou být pozorovány různé rušivé vlivy, jako je proměnná rychlost šíření signálu kanálem, špatně synchronizovaný signál se systémovými hodinami, příliš pomalu měnící se logická úroveň napětí, příliš vysoká hodnota napětí odpovídající log. 0, příliš nízká hodnota napětí odpovídající log. 1., popřípadě flukтуаční šum superponovaný na signál. Otevřené oko odpovídá minimálnímu zkreslení signálu. Zkreslení signálu v důsledku mezisymbolového rušení se projeví jako šum, což má za následek uzavření oka. [11]

### 3.1 Sestavení diagramu oka

Pro ideální sestavení tvaru diagramu oka je zapotřebí v digitálním přenosu přivést všechny možné kombinace změn log. 1 a log. 0 do přenosového systému. Taková situace je znázorněna na obr. 23, kde na levé straně jsou kombinace logických hodnot a na pravé straně potom výsledný diagram oka.



Obrázek 23: Sestavení diagramu oka

Abychom dostali pokud možno co nejvíce vypovídající diagram oka, je potřeba všechny bitové sekvence poslat vícekrát. Rozhodnutí o úrovni logické 1 a logické 0 je dáno maximálně polovinou výšky oka. A to pouze v případě, že by všechny bitové sekvence procházely po jedné křivce. V reálném systému se to nestává, proto bývá rozhodovací úroveň výrazně nižší.

Pro detailnější pochopení diagramu oka si vysvětlíme pojmy, které s tímto diagramem úzce souvisí. Jedná se např. o Q-faktor, bitovou chybovost kanálu BER (Bit Error Rate) nebo odstup signálu od šumu SNR (Signal to Noise Ratio).

## 3.2 Q-faktor

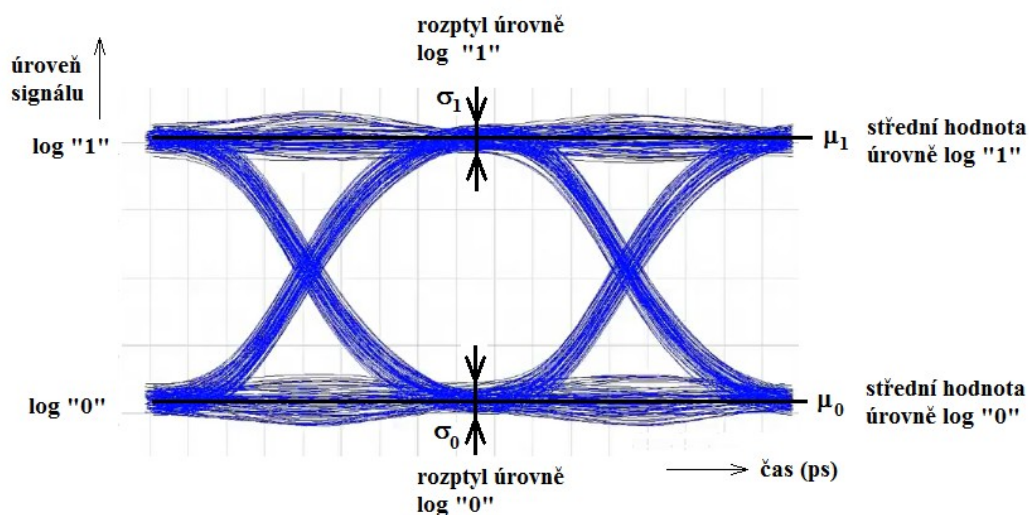
K popisu kvality diagramu oka využíváme speciální parametr. Tomuto parametru říkáme Q-faktor. Ten je dán matematickým vztahem

$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (3.1)$$

kde:

$Q$	Q-faktor
$\mu_1$	střední hodnota úrovně logické jedničky
$\mu_0$	střední hodnota úrovně logické nuly
$\sigma_1$	rozptyl hodnot úrovně logická jedna
$\sigma_0$	rozptyl hodnot úrovně logická nula

Z rovnice (3.1) je zřejmé, že čím větší je rozdíl střední hodnoty úrovně logické jedničky a střední hodnoty úrovně logické nuly, tím větší je i samotný Q-faktor. Platí zde přímá úměra. Naopak, čím větší je rozptylu hodnot logických úrovní (ať už logické nuly nebo logické jedničky), tím je diagram oka méně kvalitní a tudíž i Q-faktor nižší. Tato skutečnost je dobře zřetelná i na obr. 24.



Obrázek 24: Souvislost Q-faktoru s diagramem oka

### 3.3 BER (bitová chybovost kanálu)

Bitová chybovost kanálu je dalším parametrem vyjadřující kvalitu digitálních přenosů. Vlivem rušení se stává, že logická úroveň překročí hodnotu rozhodovací úrovně. To má za následek chybné vyhodnocení symbolu a vzniku chyby.

Matematicky se bitová chybovost kanálu dá vyjádřit poměrně jednoduše. Je to v podstatě podíl počtu chybných bitů a počtu všech přenesených bitů během sledovaného časového intervalu. To nám ukazuje vzorec (3.2). BER se udává jako bezrozměrné číslo, anebo ve formě procent.

$$BER = \frac{N_E}{N_A}, \quad (3.2)$$

kde:

$N_E$  počet chybných bitů ve sledovaném časovém intervalu

$N_A$  počet všech bitů ve sledovaném časovém intervalu

Pro vysvětlení si můžeme uvést příklad, ve kterém budeme sledovat sekvenci několika bitů. Vysílač vyšle sekvenci 10 bitů: 1 1 0 1 1 1 0 0 0 1. Nicméně přijímač může přečíst



sekvenci např. ve tvaru: 1 0 0 1 1 1 0 0 1 1. V přijímaném slovu si můžeme všimnout, že během přenosu došlo v důsledku chybného vyhodnocení symbolu ve sledovaném časovém intervalu ke dvěma chybám. Tuto skutečnost nám právě popisuje parametr BER, který je v tomto případě roven 0,2. Bitovou chybovost kanálu určíme tím přesněji, čím větší bude sledovaný časový interval.

Bitová chybovost kanálu BER je úzce spjata s Q-faktorem. Q-faktor definovaný v rovnici (3.1) upravíme způsobem, kdy od střední hodnoty úrovně logické jedničky nebo nuly odečteme optimální hodnotu  $\gamma_{OPT}$ . Tento postup je zobrazen podle rovnice (3.3).

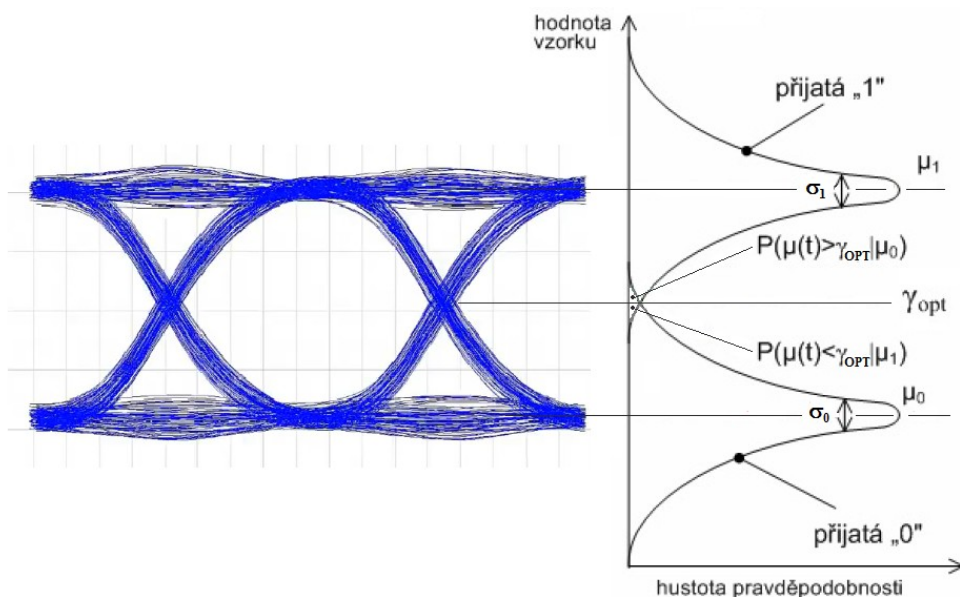
$$Q = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} = \frac{\mu_1 - \gamma_{OPT}}{\sigma_1} = \frac{\gamma_{OPT} - \mu_0}{\sigma_0}, \quad (3.3)$$

kde

$\gamma_{OPT}$  optimální hodnota

Rovnici optimální hodnoty (3.4) si lze potom z rovnice (3.3) odvodit, zapíšeme ji ve tvaru

$$\gamma_{OPT} = \frac{\sigma_0 \mu_1 - \sigma_1 \mu_0}{\sigma_1 + \sigma_0} \quad (3.4)$$



**Obrázek 25: Hustota pravděpodobnosti BER**

Hustota pravděpodobnosti BER  $P(\mu(t) > \gamma_{OPT} | \mu_0)$  z obr. 25 udává hodnotu, která nastane, když pravděpodobnost  $\mu(t)$  je větší než optimální hodnota nebo střední hodnota úrovně logické nuly. Hustota pravděpodobnosti BER  $P(\mu(t) < \gamma_{OPT} | \mu_0)$  udává hodnotu, pokud  $\mu(t)$  je menší než optimální hodnota nebo střední hodnota úrovně logické jedna.

### 3.4 SNR (odstup signálu od šumu)

Odstup signálu od šumu SNR je pojem, který vyjadřuje, jak je daný signál ovlivněn šumem. Tento parametr je definován jako poměr výkonu signálu  $P_S$ , vyjadřující přenášené informace, a šumu v pozadí  $P_N$ , jakožto nežádoucího rušení. Matematicky zapisujeme ve tvaru rovnice (3.5)

$$SNR = \frac{P_S}{P_N}, \quad (3.5)$$

kde:

$P_S$  výkon signálu

$P_N$  výkon šumu

Velikosti signálu i šumu musí být změřeny v jednom časovém okamžiku. SNR lze získat i na základě výpočtu druhé mocniny amplitudy. V takovémto případě platí rovnice (3.6)

$$SNR = \left( \frac{A_S}{A_N} \right)^2, \quad (3.6)$$

kde:

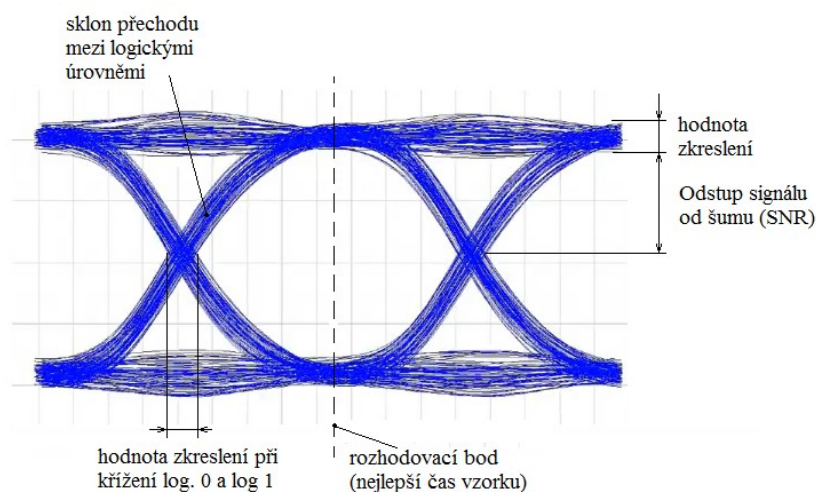
$A_S$  střední kvadratická hodnota amplitudy (RMS) signálu

$A_N$  střední kvadratická hodnota amplitudy šumu

Vzhledem k tomu, že mnoho signálů má velmi široký dynamický rozsah, je SNR často vyjádřen v logaritmickém měřítku v decibelech - rovnice (3.7).

$$SNR = 10 \log_{10} \left( \frac{P_S}{P_N} \right) \quad [\text{dB}] \quad (3.7)$$

Na obr. 26 je popsána souvislost odstup signálu od šumu v diagramu oka [6][1][9][17].



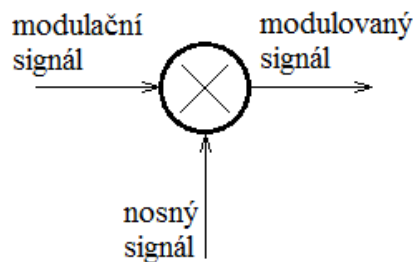
Obrázek 26: Souvislost SNR s diagramem oka

## 4 MODULÁTORY

Modulátor je zařízení, které provádí modulaci signálu. Samotná modulace signálu pracuje na principu, kdy se mění charakter nosného signálu pomocí modulujícího signálu. Tento princip je znázorněn na obr. 27. Modulace může být řešena pomocí fáze, frekvence, amplitudy nebo polarizace modulovaného paprsku.

Obecně se modulátory využívají v digitálních přenosech s vyššími rychlostmi. Je to z toho důvodu, že při průchodu elektrického proudu diodou se dioda zahřívá, ten ohřev je dynamický a mění se spektrum LD. Jediná cesta, jak tomu zabránit je nechat procházet konstantní proud (konstantní optický výkon). Pak se modulace musí provádět na optickém svazku, dioda je stabilní, oddělena od modulačních obvodů.

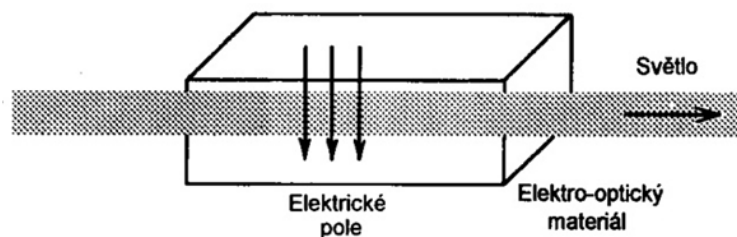
V optických přenosech se setkáváme se třemi typy modulátorů. Jedná se o elektrooptické, akustooptické a magnetooptické. Charakteristika těchto modulátorů je popsána níže. [20]



Obrázek 27: Princip modulátoru

### 4.1 Elektrooptické modulátory

Elektrooptický modulátor je zařízení, ve kterém je modulace paprsku světla řízená elektrooptickým jevem. V případě elektrooptických modulátorů se jedná o změnu indexu lomu způsobenou přiloženým elektrickým polem. Princip fungování těchto modulátorů znázorňuje obr. 28.



**Obrázek 28: Princip elektrooptického modulátoru**

Přiložení elektrického pole způsobí přerozdělení vázaného náboje a případně mírnou deformaci krystalové mřížky. To má za následek změnu optických vlastností materiálu. To tedy znamená, že statické elektrické pole přiložené k elektrooptickému materiálu ovlivňuje jeho index lomu a tím se mění působení materiálu na procházející světlo. Elektrické pole tak působí na procházející světlo.

Elektrooptický jev (resp. přerozdělení nábojů) bude záviset na poměru intenzit přiloženého pole a pole uvnitř atomu.

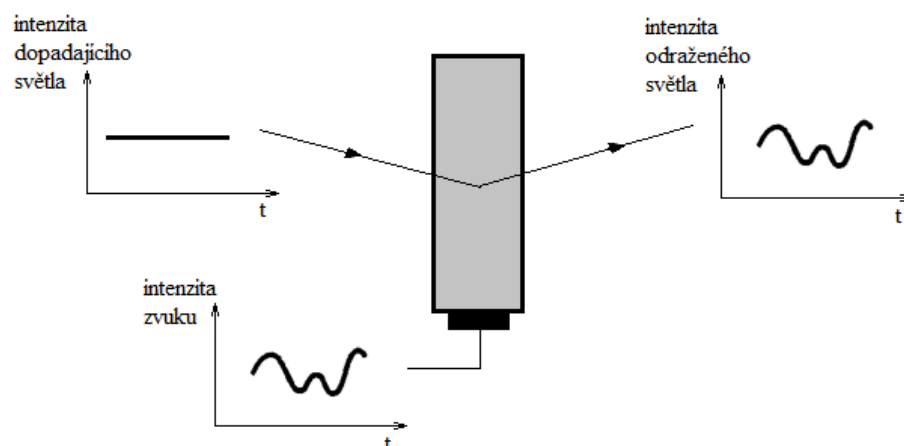
U tohoto typu modulátoru většinou modulujeme pomocí fáze, polarizace nebo amplitudy. Nejčastější používaná metoda je modulace intenzity, kterou využívá i Mach-Zehnderův modulátor. Mezi základní charakteristiky patří hloubka modulace

$$\Delta = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \approx 95\%, \quad (4.1)$$

šířka pásma, udávající rozsah frekvencí přiloženého pole, ve kterých lze modulátor používat (Obecně platí, že šířka pásma je dána rozdílem nejvyšší a nejnižší frekvence, na kterých hloubka modulace klesne na 50% své maximální hodnoty, tj. pokles o 3dB) a požadovaný příkon, který bývá obvykle větší než 300 μW/MHz. [18][15]

## 4.2 Akustooptické modulátory

Méně využívaným modulátorem je modulátor akustooptický. Ten je založen na dvou základních jevech, na fotoelastickém a akustooptickém. Fotoelastický jev nám popisuje změnu indexu lomu prostředí vyvolanou mechanickým namáháním. Akustooptický jev je dán změnou indexu lomuprostředí při průchodu zvuku. Můžeme tedy charakterizovat tento typ modulátorů jako zařízení, ve kterých je modulace paprsku světla řízená akustooptickým jevem. Akustooptické modulátory jsou principiálně zobrazeny na obr. 29. [19]

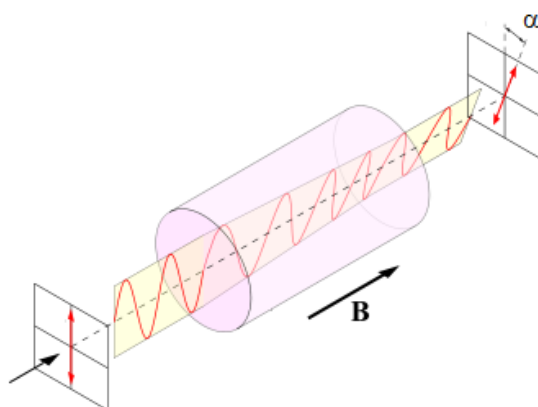


Obrázek 29: Princip akustooptického modulátoru

### 4.3 Magnetooptické modulátory

Pro úplnost uvádím ještě modulátory zvané magnetooptické. Tento typ modulátoru je zařízení, ve kterém je modulace paprsku světla řízená magnetooptickým jevem. Principem tohoto jevu je změna optických vlastností prostředí způsobená přiloženým magnetickým polem.

Původně izotropní prostředí se po přiložení magnetického pole  $B$  ve směru šíření světla změní v prostředí anizotropní. Takové prostředí způsobuje stáčení roviny polarizace světla v podélném směru šíření. Tuto skutečnost popisuje Faradayův jev (obr. 30). [17][23]

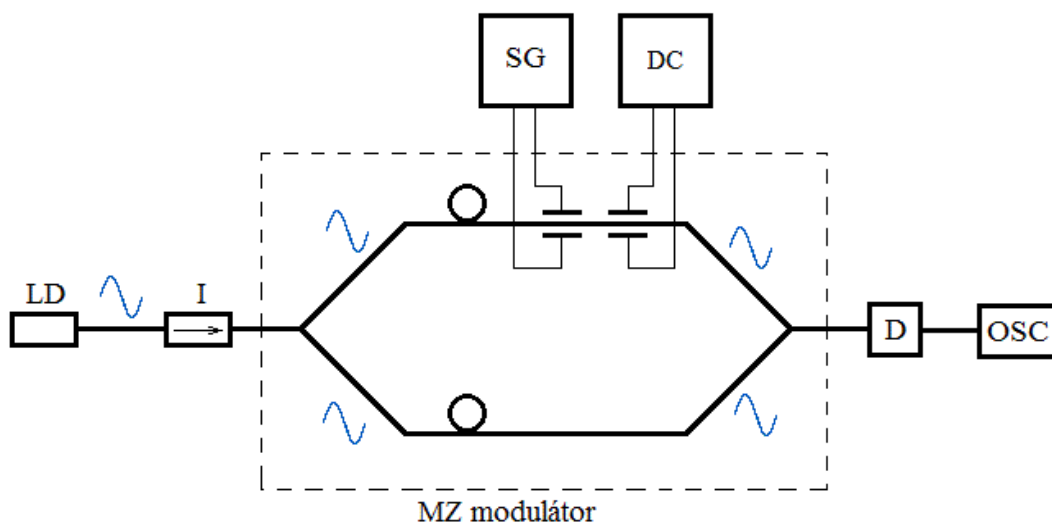


Obrázek 30: Faradayův jev

## 5 PROMĚŘENÍ VLASTNOSTÍ MACH-ZEHNDEROVA MODULÁTORU

### 5.1 Schéma zapojení měřeného okruhu

Schéma zapojení na obr. 31 vyjadřuje návrh experimentální sestavy Mach-Zehnderova interferometru s elektrooptickým modulátorem. Jsou použity prvky jako laserová dioda LD (speciální DFB laserová dioda), izolátor I, měřený Mach-Zehnderův modulátor (ke kterému je připojen signálový generátor SG a zdroj stejnosměrného napětí DC), dále detektor D a osciloskop OSC.



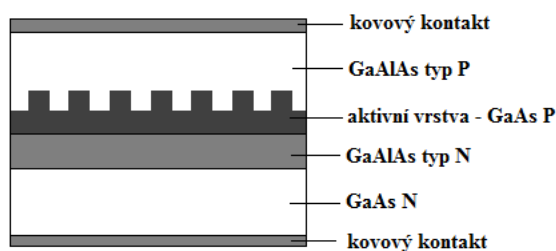
Obrázek 31: Experimentální sestava Mach-Zehnderova interferometru

Na výstupu DFB laserové diody s vlnovou délkou  $\lambda=1550\text{nm}$  je použit izolátor I (obr. 32), který slouží k oddělení parazitních odrazů, které by mohly vést k rušení monochromatickosti DFB laserové diody.



Obrázek 32: DFB laser s izolátorem

Samotný DFB laser patří mezi lasery s rozloženou zpětnou vazbou. Rezonátor tohoto typu laseru je konstruován bez použití zrcadel, za pomoci prostorových periodických struktur (difrakčních mřížek). Funkce je založena na periodické změně indexu lomu ve směru šíření. Zpětná vazba vznikne Braggovským rozptylem pomocí vlny šířící se do opačného směru. Struktura takového laseru je znázorněna na obr. 33.



**Obrázek 33: Struktura DFB**

Lasery DFB jsou vhodné pro pracovní vlnové délky 300 až 1550nm. Po nahrazení rezonátoru optickou mřížkou totiž umožňují jednomódový provoz. Výhodou těchto laserů je úzká spektrální šířka (menší než 1nm), snadná výroba a velká modulační šířka pásma (až desítky gigahertzů). [4]

Dále světelné vlnění postupuje do Mach-Zehnderova modulátoru (obr. 34), který rozdělí paprsek do dvou ramen. Modulátor, kromě vstupního a výstupního optického signálu, obsahuje také radiofrekvenční vstup RF a piny pro přivedení ss. napětí. Obecně se modulátor využívá v systémech s vyššími přenosovými rychlostmi. Důvod je rozveden v kapitole 4.



**Obrázek 34: Mach-Zehnderův modulátor**

Modulovat signál můžeme pomocí radiofrekvenčního vstupu RF, na který připojíme signálový generátor (obr. 35). V závislosti na změně kmitočtu se nám mění amplituda signálu.



**Obrázek 35: Signálový generátor**



K modulátoru lze přivést i zdroj stejnoměrného napětí (obr. 36). Pomocí tohoto zdroje dokážeme posouvat fázi vlnění v jednom rameni (Defaultně, pokud nepřivedeme do MZ modulátoru žádné napětí, je tento modulátor rozladěn. To znamená, že nemá obě vlnění ve fázi).



Obrázek 36: Zdroj stejnosměrného napětí

Výsledné vlnění nám detekuje detektor D (obr. 37). Do detektoru přivádíme optický signál z výstupu Mach-Zehnderova modulátoru. Výstupem je již elektrický signál, který může být zobrazen na osciloskopu. V případě tohoto měření byl použit detektor, který zvládal věrohodně detekovat frekvence do 1MHz.



Obrázek 37: Detektor

Pro zobrazení výstupního signálu poslouží osciloskop (obr. 38). Osciloskop je elektronický měřicí přístroj s obrazovkou vykreslující časový průběh měřeného napěťového signálu. Pomocí tohoto zařízení sledujeme průběhy při proměřování MZ modulátoru. Zobrazíme si na něm amplitudově frekvenční charakteristiku, fázový posun vlnění v MZ modulátoru i diagram oka, který nám poslouží pro detailnější analýzu přenosového systému.



Obrázek 38: Osciloskop



## 5.2 Katalogové hodnoty MZ modulátoru

Před zahájením měření Mach-Zehnderova modulátoru je nutné se podívat na katalogové hodnoty. V tabulce 1 jsou vybrány ty nejpodstatnější.

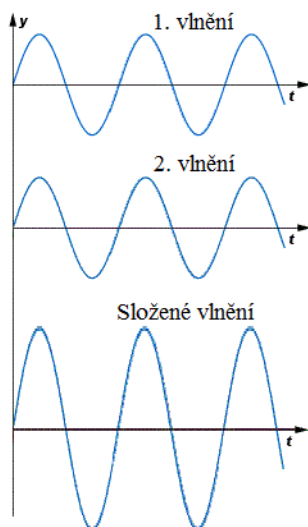
Parameter	Min	Typ	Max	Unit
Operating Case Temperature	0		70	°C
Operating Wavelength	1525		1605	nm
Optical Insertion Loss		4.0	5.0	dB
Bit Rate Frequency	9.953		12.5	Gb/s
Bandwidth	10.0/12.0			GHz
RF Drive voltage (PRBS)		5.5	6	V
DC Bias Voltage Range	-8		8	V
PD Responsivity	0.1		0.5	mA/mW

Tabulka 1: Příklad katalogových hodnot MZ modulátoru

Důležitým parametrem je provozní teplota (Operating Case Temperature). Ta se pohybuje v rozmezí od 0°C po 70°C. V mém případě probíhalo měření při pokojové teplotě, tj. při cca. 20°C. Dalším parametrem je pracovní vlnová délka (Operating Wavelength). Z katalogových hodnot můžeme vyčíst, že se nachází v rozmezí 1525nm až 1605nm (Klasické jednomódové vlákno pracující na vlnové délce 1550nm). Co se týče optického vložného útlumu (Optical Insertion Loss), ten se pohybuje maximálně do 5dB. Přenosová rychlost (Bit Rate Frequency) je udávána do 12,5Gb/s. Šířka pásma (Bandwidth) tomu odpovídá. Parametr RF Drive voltage (PRBS) nám říká, jaké můžeme přivést napětí na radiofrekvenční vstup pomocí pseudonáhodného binárního generátoru kódu. Tento generátor je důležitý při pozorování a analýze signálu, použitého v digitálním přenosu. Analýzu nám zachytí diagram oka. Neméně důležitým parametrem je také DC Bias Voltage Range. Jedná se o rozsah napětí přiváděného do MZ modulátoru. Význam je takový, že se nám vlna v jednom rameni, po přivedení napětí do modulátoru, fázově posune. V defaultním případě, tj. při DC=0V, je modulátor rozladěn (vlny nejsou ve fázi). Posledním parametrem, který zde zmíním je citlivost detektoru (PD Responsivity). Ta se pohybuje v rozmezí od 0,1 do 0,5mA/mW.

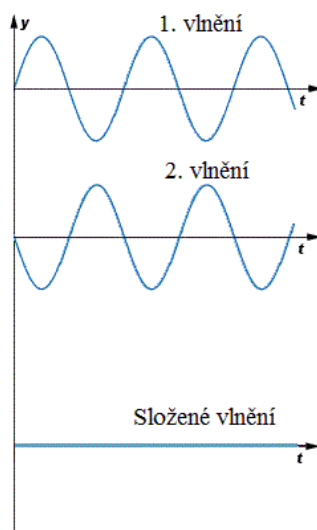
### 5.3 Zobrazení výstupu na detektoru

Vlny se v místě zapojení detektoru skládají. Při skládání vlnění může dojít ke dvěma mezním situacím. První z ní nastane, pokud obě dvě vlnění mají stejnou fázi a frekvenci. Pak výsledné složené vlnění je charakterizováno vyšší amplitudou. U takovéto situace říkáme, že se jedná o konstruktivní interferenci (obr. 39).



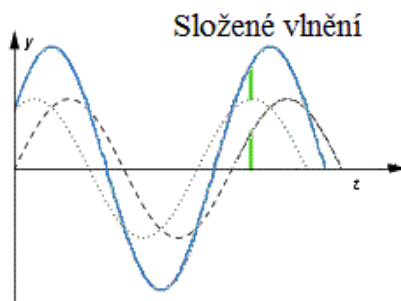
Obrázek 39: Konstruktivní interference

Druhá mezní situace nastane, pokud obě vlnění mají stejnou amplitudu a frekvenci, ale opačnou fázi. Tomuto případu říkáme destruktivní interference (obr. 40).



Obrázek 40: Destruktivní interference

Mimo tyto mezní situace nastává samozřejmě i případ, kdy jsou dvě vlny o stejné frekvenci fázově posunuty. V takovémto případě je výsledné vlnění součtem dílčích vlnění v daném bodě. To popisuje obr. 41.



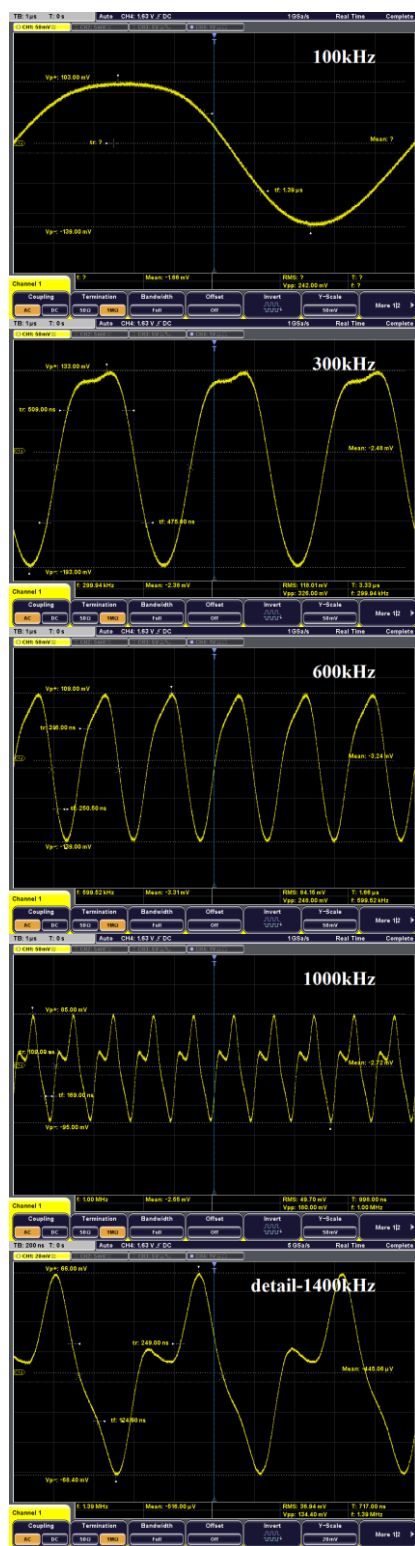
Obrázek 41: Složené vlnění

## 5.4 Naměřené hodnoty

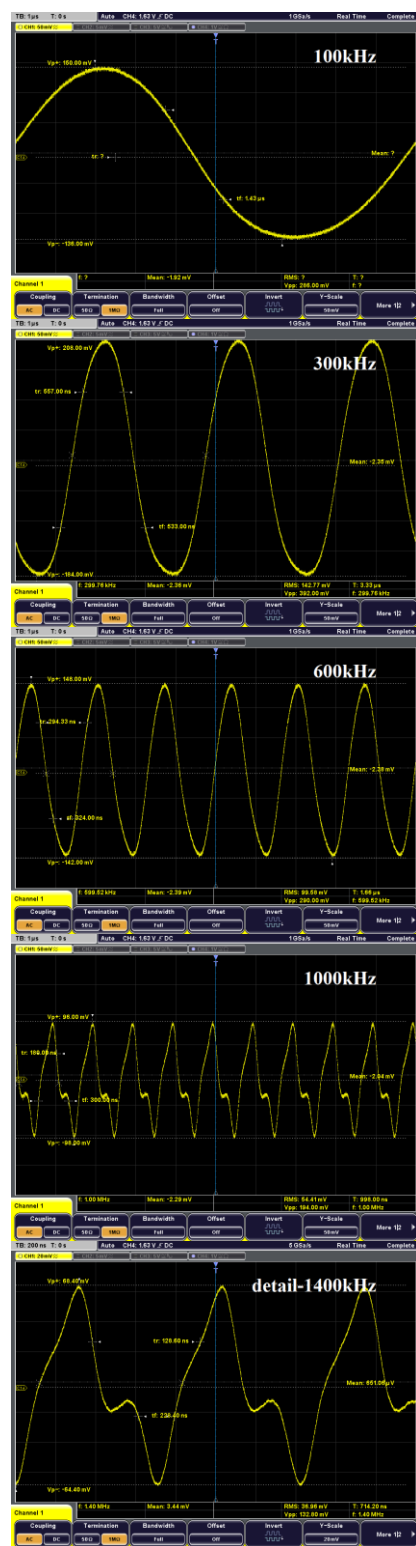
Cílem je proměřit amplitudově-frekvenční charakteristiku, změřit fázový posun vlny v jednom rameni modulátoru pomocí přivedeného stejnosměrného napětí a provést pozorování a analýzu signálu použitého při digitálním přenosu pomocí diagramu oka.

### 5.4.1 Měření amplitudově-frekvenční charakteristiky

Při proměřování amplitudově-frekvenční charakteristiky jedno měření probíhalo bez přivedeného napětí (případ, kdy je modulátor rozladěn, vlny v obou ramenech nejsou ve fázi) a další po přivedení stejnosměrného napětí 1,5V (případ, kdy jsou vlny ve fázi). Trend výstupního signálu můžeme vidět na sérii obrázků níže (obr. 42). V levém sloupci je znázorněna situace, kdy není do modulátoru přivedeno žádné napětí. To má za následek, že na výstupu vidíme periodický signál, nikoliv však harmonický. V pravém sloupci již je přivedeno stejnosměrné napětí 1,5V. To nám signál v jednom rameni posune do fáze se signálem v druhém rameni. Proto na výstupu, na osciloskopu, vidíme nezkreslenou sinusovou křivku, harmonický signál. Toto měření bylo realizováno pro proud z DFB laserové diody 15mA, což odpovídá výkonu 1,78mW.



a



b

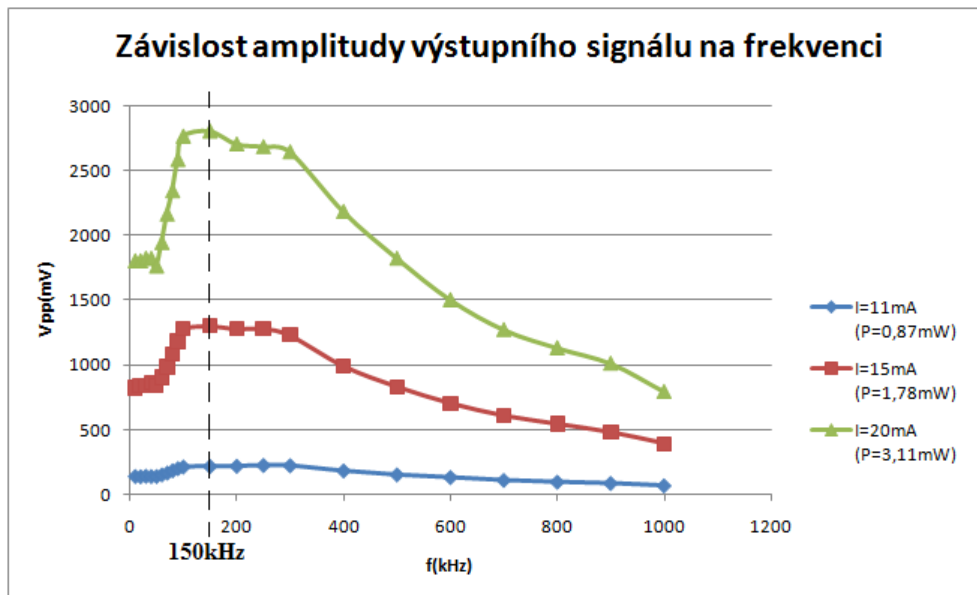
Obrázek 42: Průběh výstupního signálu pro různé kmitočty přivedené na RF vstup pro DC=0V (a) a pro DC=1,5V (b)

Samotný modulátor má šířku pásma 12GHz, nicméně měření frekvenční charakteristiky probíhalo pouze do 1MHz, neboť jsem neměl k dispozici detektor, který by vyšší frekvence dokázal věrohodně detekovat. Při vyšších frekvencích již dochází ke zkreslení signálu.

Dále se podíváme na situaci, kdy je amplitudově-frekvenční charakteristika zanesená do grafu (obr. 43). Tato charakteristika je z důvodu omezení detektorem měřená pouze do 1MHz. Měření bylo uskutečněno pro 3 různé úrovně proudů DFB laseru (11mA; 15mA; 20mA) a jim odpovídajícím výkonům (0,87mW; 1,78mW; 3,11mW). V závislosti na frekvenci sledujeme amplitudu modulovaného signálu. Z grafu je patrné, že amplituda signálu dosahuje maxima kolem 150kHz, poté klesá. Naměřené hodnoty nám udává tabulka 2.

f(kHz)	V <sub>pp</sub> (mV)		
	<i>Pro I=11mA</i>	<i>Pro I=15mA</i>	<i>Pro I=20mA</i>
10	142	824	1800
20	140	840	1800
30	144	840	1820
40	142	864	1820
50	142	840	1760
60	154	904	1940
70	168	984	2160
80	186	1080	2340
90	202	1180	2580
100	214	1280	2760
150	218	1300	2800
200	220	1280	2700
250	226	1280	2680
300	224	1230	2640
400	184	992	2180
500	154	832	1820
600	134	704	1500
700	112	608	1270
800	98,4	544	1130
900	88,8	480	1010
1000	70,4	392	792

Tabulka 2: Naměřené hodnoty amplitudově-frekvenční charakteristiky



Obrázek 43: Amplitudově-frekvenční charakteristika

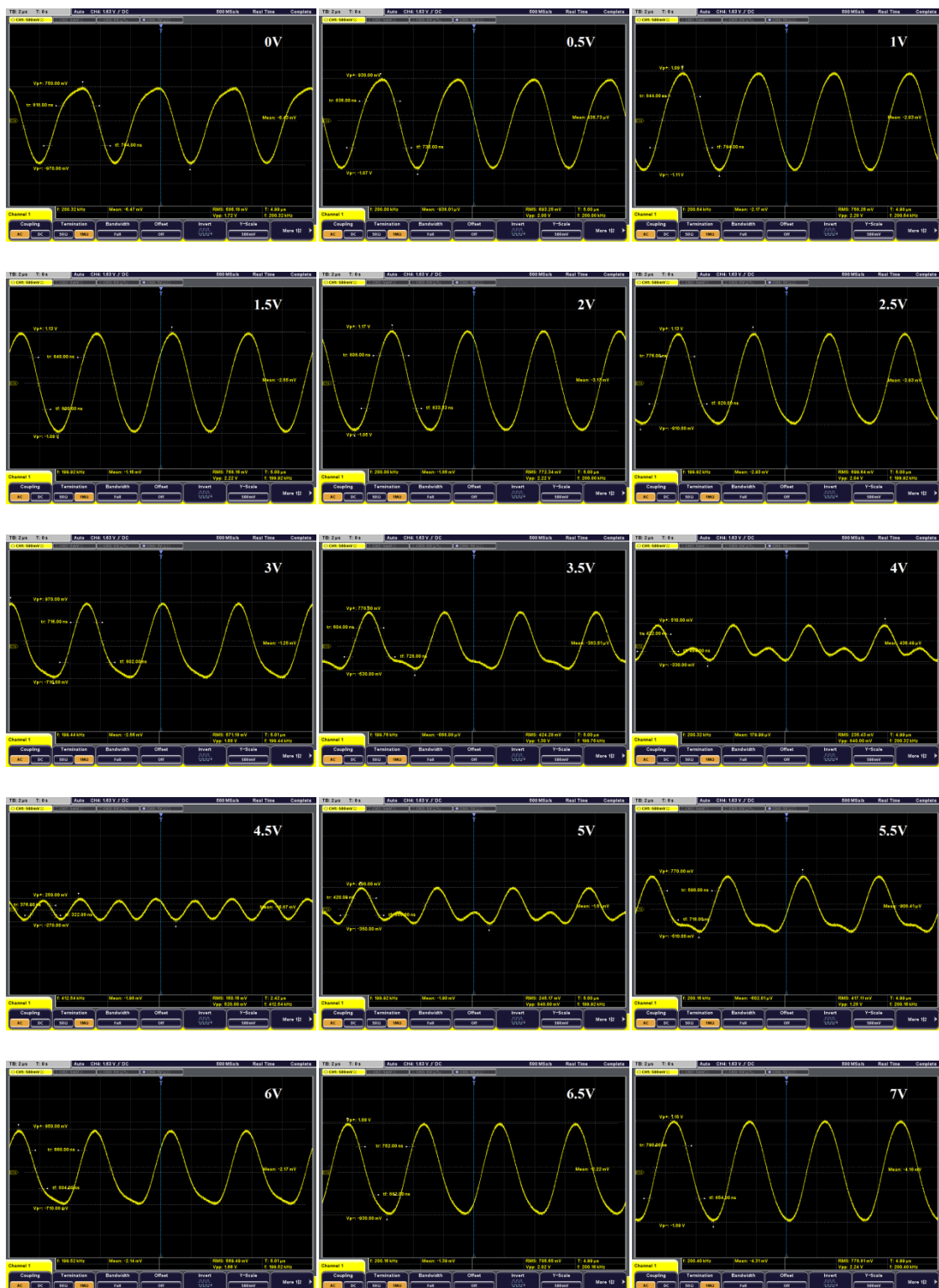
#### 5.4.2 Měření fázového posuvu vlnění v MZ modulátoru

Mach-Zehnderův modulátor, mimo radiofrekvenčního vstupu, obsahuje také vstup pro přivedení stejnosměrného napětí. Změnou velikosti tohoto napětí docílíme, že se nám vlna v jednom rameni fázově posune, což se projeví i na výsledném modulovaném signálu. Na sérii obrázků (obr. 44) je přiváděno ss. napětí od 0V do 7V s krokem 0,5V (Samotný modulátor podle katalogových hodnot je konstruován do 8V).

Pokud do modulátoru nepřivedeme žádné napětí ( $DC=0V$ ), můžeme si všimnout, že vlny v obou ramenech jsou navzájem fázově posunuty. To znamená, že modulátor je rozladěn a výsledný signál pozorovaný na detektoru nedosahuje maximální amplitudy.

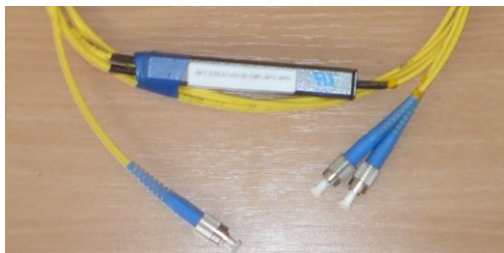
Při podrobnějším sledování výstupního signálu pozorujeme, že vlny putující v obou ramenech se dostanou do fáze při přivedení ss. napětí 1,5V. V tomto případě vidíme výstupní signál, s maximální úrovní amplitudy, zobrazený na osciloskopu.

Poslední zajímavá situace nastane při přivedení napětí 4,5V. Na sérii obrázků níže si můžeme všimnout, že právě toto napětí má za následek posunutí vlny o  $180^\circ$  vůči vlně putující ve druhém rameni. Výsledné vlnění se takřka vyruší.



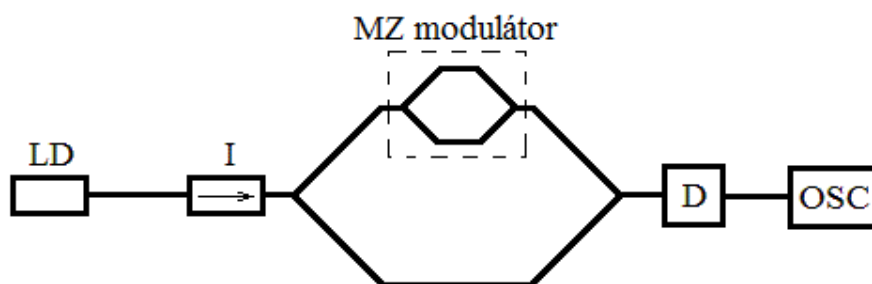
Obrázek 44: Průběh výstupního signálu pro přivedené ss. napětí 0V až 7V po kroku 0,5V

Obdobný průběh signálu, bez přivedení stejnosměrného napětí, můžeme také pozorovat, pokud do zapojení zavedeme ještě jedno rameno pomocí splitteru (prvek, který nám rozdělí optickou trasu do dvou větví) a coupleru (prvek, který slouží ke sloučení dvou optických signálů do jednoho optického vlákna). Tyto prvky jsou zobrazeny na obr. 45.



Obrázek 45: Splitter, Coupler

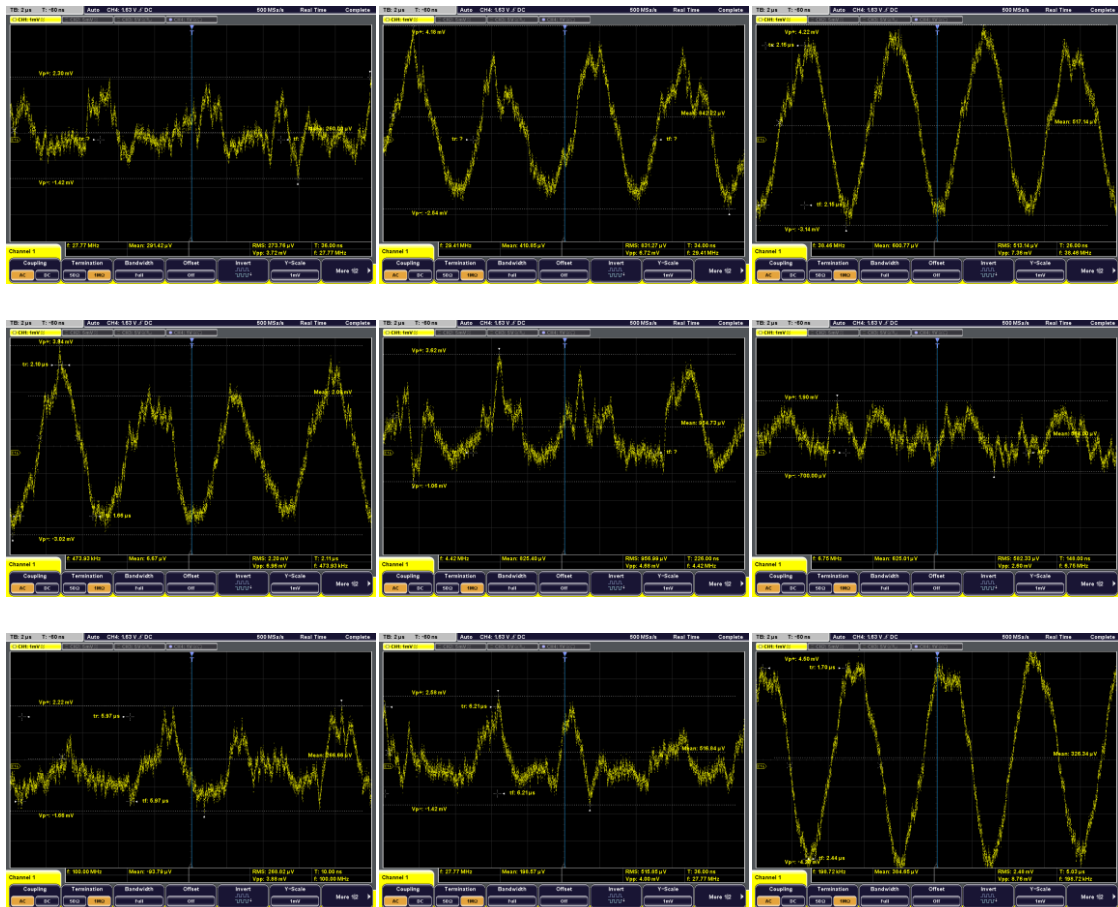
MZ modulátor poté připojíme k jednomu z těchto ramen. Schéma takového zapojení je zobrazeno na obr. 46. Na osciloskopu je patrné postupné skládání vln.



Obrázek 46: MZ modulátor s použitím splitteru a coupleru

Signál není tak čistý jako při posouvání fáze následkem přiloženého napětí, neboť při použití optických vazebních členů (splitter, coupler), dochází k útlumu na těchto prvcích (každý takovýto prvek zavede do obvodu útlum 3dB, tj. klesne výkon signálu na polovinu). Výsledný signál na detektoru již je slabý a ovlivněn šumem. Skládání vln v tomto zapojení zachycuje série snímků na další straně (obr. 47).

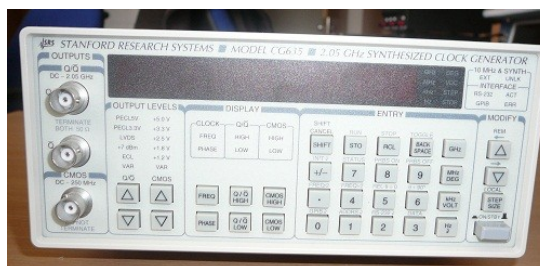




Obrázek 47: Průběhy výstupního signálu v zapojení se splitterem a couplerem

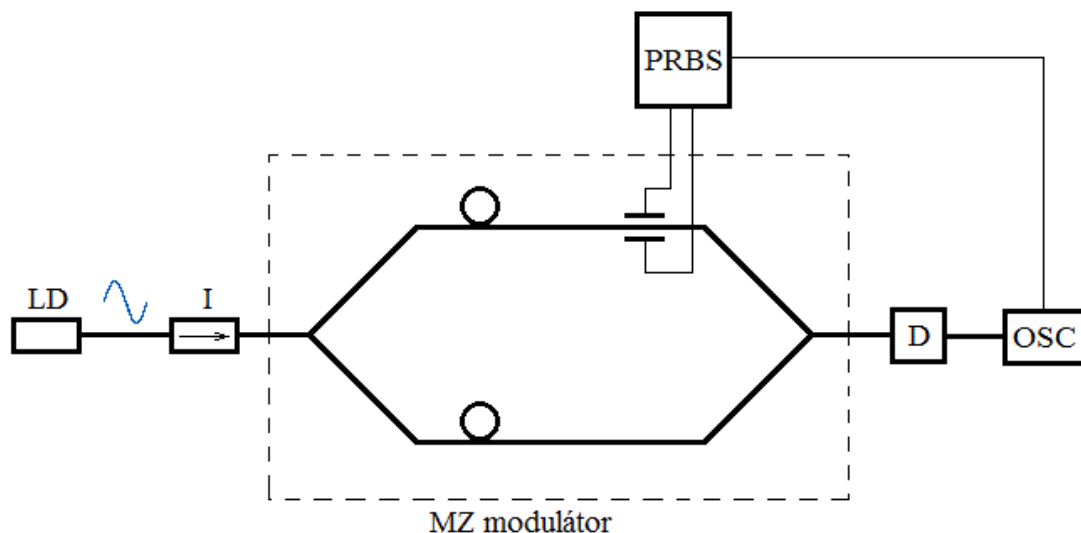
### 5.4.3 Diagram oka

Diagram oka dostaneme, pokud do digitálního přenosového systému budeme náhodně posílat všechny kombinace úrovní logických nul a jedniček a následně za pomoci osciloskopu sledovat, s jakou rychlostí se tyto změny budou provádět. Pro vyslání takovéto bitové sekvence slouží pseudonáhodný binární generátor kódu PRBS (obr. 48).



Obrázek 48: Pseudonáhodný binární generátor kódu

Schéma zapojení (obr. 49) je podobné jako v případě měření frekvenčně-amplitudové charakteristiky. S tím rozdílem, že na RF vstup nepřipojíme signálový generátor ale pseudonáhodný binární generátor kódu.

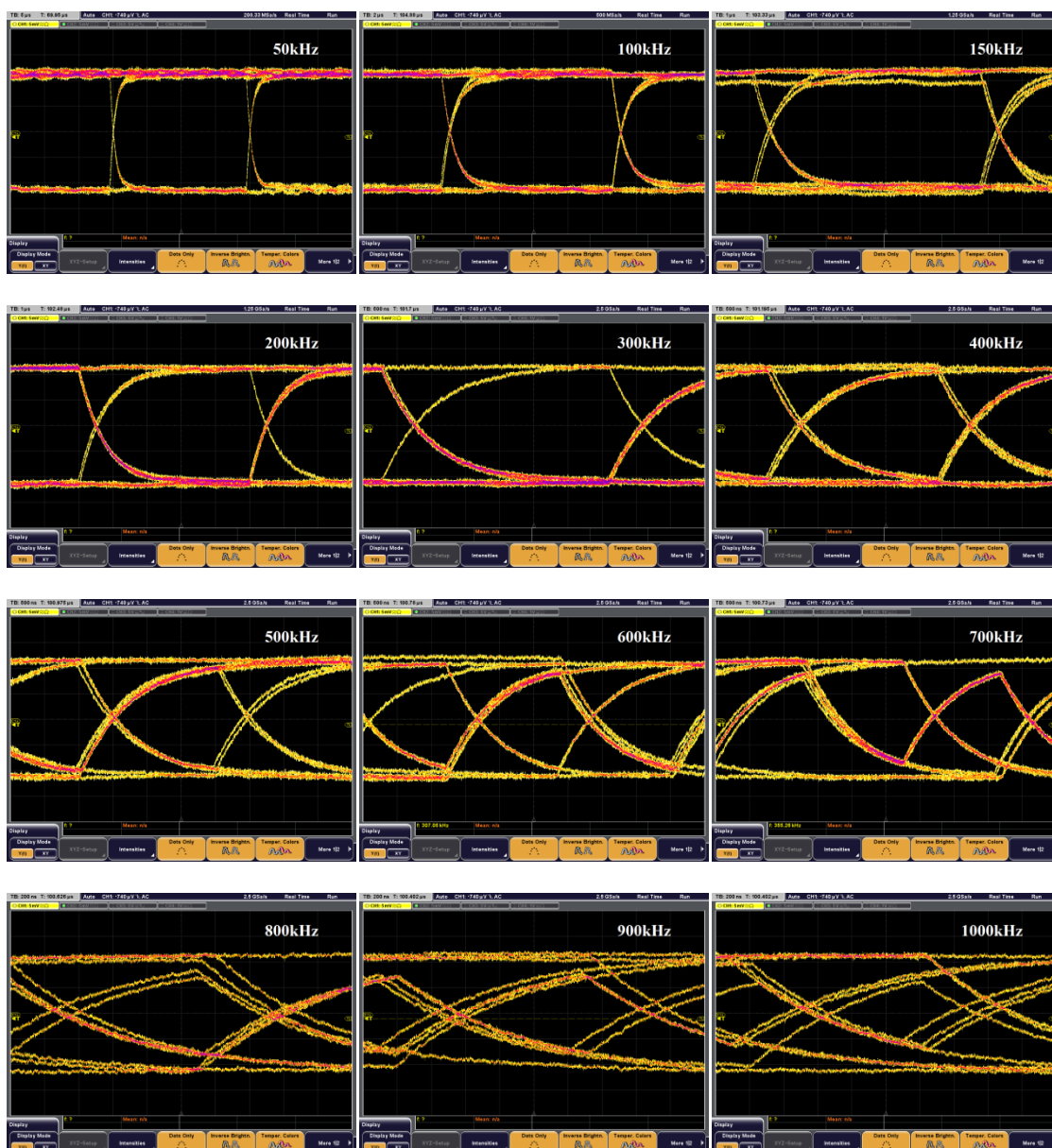


Obrázek 49: Zapojení pro měření diagramu oka

V závislosti na frekvenci sledujeme, jak se diagram oka chová. Obecně platí, že s vyšší přenosovou rychlostí se graf oka deformuje. Je to dáno především tím, že pro vyšší přenosové rychlosti se nestihne překlopit úroveň signálu z logické jedničky na logickou nulu (nebo naopak). To má za následek menší hodnotu rozevření oka. O tom, jakou hodnotu má logický signál, pojednává rozhodovací úroveň.

Ze sérií obrázků (obr. 50) je dobře vidět, že při nižších frekvencích jsou parametry popisující kvalitu digitálního přenosu velmi dobré. Naopak při vyšších kmitočtech, blízcích se 1MHz, je diagram oka již silně deformován. V případě tohoto měření byly přiváděny frekvence v rozmezí 50kHz až 1000kHz.

Odstíny barev určují, jak často se signál přivedený pseudonáhodným binárním generátorem v daném bodě nachází. Signál zbarvený do červena znamená větší četnost překrývání ostatními signály. Všimněme si, že takovýto signál pozorujeme při nižších frekvencích, kdy není ještě diagram oka deformovaný, hodnota zkreslení je minimální. Naopak signál, přivedený pseudonáhodným binárním generátorem, zobrazený na osciloskopu pomocí žluté barvy značí, že není překryt jiným signálem (prošel daným místem pouze jednou) a nejde po stejné dráze jako předešlá vygenerovaná náhodná kombinace logických úrovní. Tím se ale hodnota zkreslení zvětšuje, diagram oka deformuje a parametry, které popisují kvalitu tohoto oka, se zhoršují.



Obrázek 50: Průběhy diagramu oka pro různé frekvence

## 5.5 Zhodnocení výsledků

Tato diplomová práce pojednává o problematice použití Mach-Zehnderova interferometru jako modulátoru pro optické komunikace. Teoretická část nám vysvětluje pojmy, které jsou nezbytné k pochopení problematiky diplomové práce. Objasňuje nám důležité poznatky, které je nutné znát při následném praktickém měření. Vyzdvihl bych pojmy jako je interference (skládání, vzájemné ovlivňování) vlnění, princip fungování Mach-Zehnderova interferometru, kde se nám paprsek světla rozdělí do dvou ramen, funkci diagramu oka a u modulátorů bych zdůraznil jejich využití. A to je především v systémech s vyššími přenosovými rychlostmi.

V praktické části jsem navrhl a realizoval experimentální sestavu Mach-Zehnderova interferometru s elektrooptickým modulátorem. Při měření frekvenčního rozsahu MZ modulátoru jsem byl omezen detektorem, jenž zvládal věrohodně detekovat frekvence pouze do 1MHz. Toto omezení bych označil jako kritický vliv při proměřování velikosti rozsahu. Při zjišťování amplitudově-frekvenční charakteristiky jsem měřil pro 3 různé úrovně proudu DFB laseru a jim odpovídajícím výkonům. A to pro 11mA, 15mA a 20mA.

Modulátor byl v defaultním stavu, tj. bez přivedení ss. napětí, rozladěn. Bylo potřeba zjistit, při jakém napětí budou vlny v obou ramenech MZ modulátoru ve fázi. Tuto hodnotu jsem stanovil na 1,5V. Pokud jsem do zapojení zavedl ještě jedno rameno pomocí splitteru a coupleru a MZ modulátor připojil k jednomu z těchto ramen, sledoval jsem obdobný průběh výstupního signálu jako při přivedení ss. napětí.

Posledním bodem měření bylo provést pozorování a analýzu signálu použitého v digitálním přenosu, k tomu se využívá diagram oka. S diagramem oka jsou spjaty parametry jako je Q-faktor, bitová chybovost kanálu BER nebo odstup signálu od šumu SNR. Jejich podrobnější popis je uveden v diplomové práci. Došel jsem k závěru, že se vzrůstající přenosovou rychlostí se graf diagramu oka deformuje, parametry popisující kvalitu digitálního přenosu se zhoršují.

Celá práce je sestavena jako souhrn teoreticky známých faktů vztažených k zadané problematice diplomové práce doložených konkrétními výsledky získanými měřeními na experimentální sestavě. MZ modulátor bude sloužit jako pomůcka k pochopení dané problematiky v praktické výuce.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] GHATAK, Ajoy; THYAGARAJAN, K. *Introduction to fiber optics*. Cambridge : Cambridge University Press, 1998. 565 s. ISBN 0521571200.
- [2] JAIN, Sanjay D. & Sahasrabudhe ; GIRISH, G. *Engineering Physics*. India : Universities Press, 2010. 593 s. ISBN 9788173716782.
- [3] BORN, Max; WOLF, Emil. *Principles of Optics*. 7th ed. Cambridge (Massachussets) : Cambridge University Press, 1999. 576 s. ISBN 0-521-78449-2.
- [4] *Odbornecasopisy.cz* [online]. FCC PUBLIC s. r. o., 2010 [cit. 2011-04-30]. Světlo - Laserové diody. Dostupné z WWW: <[http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=35006](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=35006)>.
- [5] A. RUSSELL, PH.D., Daniel . *Superposition of Wave* [online]. 2010 [cit. 2010-12-30]. Superposition of Waves. Dostupné z WWW: <<http://paws.kettering.edu/~drussell/Demos/superposition/superposition.html>>.
- [6] MOREIRA, Jose; WERKMANN, Hubert. *An Engineer's Guide to Automated Testing of High-Speed Interfaces*. Norwood : Artech House Publishers , 2010. 569 s. ISBN 978-1-60783-983-5.
- [7] FICEK, Zbigniew; SWAIN, Stuart. *Quantum interference and coherence : theory and experiments*. New York : Springer Science+Business Media, 2005. 425 s. ISBN 0-387-22965-5.
- [8] DVOŘÁK, Petr. *Http://www.jiast.cz/* [online]. 2011 [cit. 2011-01-01]. Světlo X: Koherentní zdroje záření. Dostupné z WWW: <<http://www.jiast.cz/clanky/svetlo-x-koherentni-zdroje-zareni>>.
- [9] DOROCIAK, P., KYSELÁK, M., FILKA, M.,: The Optical Modulation Format Impact on Polarization Mode Disperzion, Seoul, Korea, 2008, ISSN 1738-7906
- [10] HNÁTEK, Jan. *Aldebaran* [online]. 2000 [cit. 2011-04-30]. Lissajousovy obrazce. Dostupné z WWW: <[http://www.aldebaran.cz/applets/fy\\_lissa/start.html](http://www.aldebaran.cz/applets/fy_lissa/start.html)>.
- [11] HEIJLIGERS, Marc, et al. *Members.chello.nl* [online]. 2001 [cit. 2011-04-30]. Digital Communication. Dostupné z WWW: <<http://members.chello.nl/~m.heijligers/DAChtml/digcom/digcom.html>>.

- [12] MCINTYRE, Tim. *Tim's Fabry-Perot Applet* [online]. 2006 [cit. 2011-04-30].  
Fabry-Perot Interferometer. Dostupné z WWW:  
<<http://www.physics.uq.edu.au/people/mcintyre/applets/fabry/fabry.html>>.
- [13] *Techmania : Edutorium* [online]. 2008 [cit. 2010-12-30]. Složené kmitání.  
Dostupné z WWW:  
<[http://www.techmania.cz/edutorium/art\\_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=635](http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=635)>.
- [14] RAJAGOPAL, K. *Engineering Physics*. New Delhi : PHI Learning Private Limited, 2008. 339 s. ISBN 978-81-203-3286-7.
- [15] *Fiber's Optics User's Manual & Design Series*. Boston : Information Gatekeepers, inc., 1985. 344 s.
- [16] RAJENDRAN, V. *Engineering Physics*. New Delhi : Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2009. 609 s. ISBN 978-0-07-026103-7.
- [17] KOZÁK, M.; LUCKI, M.; BOHÁČ, L. *Pandatron.cz* [online]. 2000 [cit. 2011-04-30]. Vybrané aspekty rušení v plně optických přenosových sítích. Dostupné z WWW:  
<[http://pandatron.cz/?1588&vybrane\\_aspekty\\_ruseni\\_v\\_plne\\_optickych\\_prenosovy\\_ch\\_sitich](http://pandatron.cz/?1588&vybrane_aspekty_ruseni_v_plne_optickych_prenosovy_ch_sitich)>.
- [18] VASKO, Fedor T.; KUZNETSOV, Alex V. *Electronic states and optical transitions in semiconductor heterostructures*. New York : Springer-Verlag, 1999. 413 s. ISBN 0-387-98567-0.
- [19] BASS, Michael, et al. *Handbook of Optics : Atmospheric Optics, Modulators, Fiber Optics, X-Ray and Neutron Optics*. Cambridge (Massachussets) : Cambridge University Press, 2002. 581 s.
- [20] BHATTACHARYA, Amitabha. *Digital Communication*. New Delhi : Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2006. 517 s. ISBN 0-07-0591172.
- [21] PAVELEK, M. [Http://ottp.fme.vutbr.cz/](http://ottp.fme.vutbr.cz/) [online]. 2007 [cit. 2011-01-01].  
Koherence záření. Dostupné z WWW:  
<<http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/0206.htm>>.

- [22] AKHMANOV, Sergei Aleksandrovich; NIKITIN, S. Yu. *Physical optics*. New York : Oxford Univerzity Press, 2002. 490 s. ISBN 0-19-851-795-5.
- [23] YU, Francis T. S.; YANG, Xiangyang. *Introduction to optical engineering*. Cambridge : Cambridge University Press, 1997. 403 s.

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Interference vlnění .....	4
Obrázek 2: Složené kmitání .....	6
Obrázek 3: Výsledné kmitání dvou vlnění .....	7
Obrázek 4: Výsledné kmitání dvou vlnění se stejnou a opačnou fází .....	7
Obrázek 5: Výsledné kmitání dvou vlnění se stejnou amplitudou ale opačnou fází .....	8
Obrázek 6: Záznamy .....	8
Obrázek 7: Lissajousovy obrazce pro frekvence v poměru 1:1 .....	9
Obrázek 8: Lissajousovy obrazce pro frekvence v poměru 2:1 .....	9
Obrázek 9: Lissajousovy obrazce pro frekvence v poměru 3:1 .....	9
Obrázek 10: Časová koherence - zdroj vyzařující záření o vlnové délce v intervalu $\lambda + \Delta\lambda$ .....	11
Obrázek 11: Prostorová koherence - zdroj konečné velikosti .....	12
Obrázek 12: Struktura laseru .....	13
Obrázek 13: Princip spontánní emise .....	14
Obrázek 14: Princip stimulované emise .....	14
Obrázek 15: Závislost optického výkonu laseru na dodávaném čerpaní elektrickým proudem .....	15
Obrázek 16: Michelsonův interferometr .....	19
Obrázek 17: Jaminův interferometr .....	20
Obrázek 18: Mach-Zehnderův interferometr .....	20
Obrázek 19: Vláknově optický Mach-Zehnderův interferometr .....	21
Obrázek 20: Fabry-Perotův interferometr .....	23
Obrázek 21: Diagram oka .....	24
Obrázek 22: Diagram oka v ideálním případě (a), v reálném případě (b) a v reálném případě při zkreslení (c) .....	25
Obrázek 23: Sestavení diagramu oka .....	26
Obrázek 24: Souvislost Q-faktoru s diagramem oka .....	27
Obrázek 25: Hustota pravděpodobnosti BER .....	28
Obrázek 26: Souvislost SNR s diagramem oka .....	29
Obrázek 27: Princip modulátoru .....	30
Obrázek 28: Princip elektrooptického modulátoru .....	31
Obrázek 29: Princip akustooptického modulátoru .....	32
Obrázek 30: Faradayův jev .....	32
Obrázek 31: Experimentální sestava Mach-Zehnderova interferometru .....	33
Obrázek 32: DFB laser s izolátorem .....	33
Obrázek 33: Struktura DFB .....	34
Obrázek 34: Mach-Zehnderův modulátor .....	34
Obrázek 35: Signálový generátor .....	34
Obrázek 36: Zdroj stejnosměrného napětí .....	35
Obrázek 37: Detektor .....	35
Obrázek 38: Osciloskop .....	35



Obrázek 39: Konstruktivní interference .....	37
Obrázek 40: Destruktivní interference.....	37
Obrázek 41: Složené vlnění .....	38
Obrázek 42: Průběh výstupního signálu pro různé kmitočty přivedené na RF vstup pro DC=0V (a) a pro DC=1,5V (b).....	39
Obrázek 43: Amplitudově-frekvenční charakteristika.....	41
Obrázek 44: Průběh výstupního signálu pro přivedené ss. napětí 0V až 7V po kroku 0,5V.....	42
Obrázek 45: Splitter, Coupler .....	43
Obrázek 46: MZ modulátor s použitím splitteru a coupleru.....	43
Obrázek 47: Průběhy výstupního signálu v zapojení se splitterem a couplerem.....	44
Obrázek 48: Pseudonáhodný binární generátor kódu .....	44
Obrázek 49: Zapojení pro měření diagramu oka .....	45
Obrázek 50: Průběhy diagramu oka pro různé frekvence.....	46

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Příklad katalogových hodnot MZ modulátoru.....	36
Tabulka 2: Naměřené hodnoty amplitudově-frekvenční charakteristiky .....	40

## SEZNAM PŘÍLOH

A: Katalogové hodnoty Mach-Zehnderova modulátoru Mach-10™ 056: ..... I